

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**С. О. КВІТКА, С. Ф. КУРАШКІН, О. В. СОЛОМАХА**

# **ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК  
ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

*Рекомендовано Вченою радою  
Таврійського державного агротехнологічного університету  
як навчальний посібник для підготовки фахівців зі спеціальності  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
у вищих навчальних закладах II-IV рівнів акредитації*

УДК 621.38 (075)  
К 32

*Гриф надано Вченою радою Таврійського державного агротехнологічного університету (протокол №9 від «24» квітня 2018 р.)*

**Укладачі:**     **Квітка С.О.**, доцент Таврійського ДАТУ,  
                      **Курашкін С.Ф.**, доцент Таврійського ДАТУ,  
                      **Соломаха О.В.**, старший викладач Таврійського ДАТУ

**Рецензенти:**

**Островерхов М.Я.**, д.т.н., професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Тиховод С.М.**, д.т.н., доцент, завідувач кафедри теоретичної і загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету

**Діордієв В.Т.**, д.т.н., професор, завідувач кафедри електроенергетики і автоматизації Таврійського державного агротехнологічного університету

**Квітка С.О.**

**К 32** Електроніка та мікросхемотехніка: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / С.О. Квітка, С.Ф. Курашкін, О.В. Соломаха. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 184 с.

**ISBN**

Наведено теоретичний матеріал і лабораторні роботи у програмі Multisim National Instruments з дослідження напівпровідникових приладів та електронних пристроїв: випрямних діодів, стабілітронів, біполярних та польових транзисторів, тиристорів, підсилювачів електричних сигналів змінного та постійного струмів, генераторів гармонійних коливань та імпульсних сигналів, імпульсних і цифрових пристроїв, виконаних на базі напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем, випрямлячів, згладжувальних фільтрів, стабілізаторів напруги, керованих випрямлячів, конверторів.

Посібник призначений для студентів зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» вищих навчальних закладів II-IV рівнів акредитації. Може бути корисним фахівцям, які працюють у галузі експлуатації та ремонту електронних систем.

**ISBN**

© С.О. Квітка,  
© С.Ф. Курашкін,  
© О.В. Соломаха,  
© Таврійський державний  
агротехнологічний університет,  
2018

## ЗМІСТ

Передмова	4
1	5
2 Випрямні діоди і стабілітрони	16
3 Біполярні транзистори	26
4 Польові транзистори	36
5 Тиристори	44
6 Підсилювачі на біполярних транзисторах	53
7 Підсилювачі на польових транзисторах	59
8 Операційні підсилювачі	67
9 Генератори синусоїдальних коливань	75
10 Логічні елементи. Тригери	86
11 Імпульсні пристрої на операційних	100
12 Генератори лінійно змінюваної (пилкоподібної) напруги	105
13 Випрямлячі однофазного струму	115
14 Випрямлячі з множенням напруги	121
15 Параметричні стабілізатори напруги	126
16 Компенсаційні стабілізатори напруги	131
17 Трифазні випрямлячі	138
18 Керовані випрямлячі	145
Імпульсні перетворювачі постійної напруги (конвертори)	151
Додатки	183
Список використаних джерел	

## ПЕРЕДМОВА

Навчальна дисципліна «Електроніка та мікросхемотехніка» відіграє важливу роль у загальній програмі підготовки фахівців зі спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» і передбачає вивчення фізичних основ напівпровідникових приладів і принципу їх роботи, електричних характеристик і параметрів, а також принципів побудови і розрахунку типових пристроїв аналогової та цифрової техніки.

Жодна галузь техніки не обходиться без застосування електронних пристроїв – це контроль технологічних параметрів, керування різноманітними технологічними процесами у виробництві, керування електроприводами, системи обміну і передачі інформацією тощо. В сучасних електронних засобах широко застосовуються інтегральні мікросхеми, що дозволяє отримати компактні вузли електронних пристроїв.

У даному посібнику наведено теоретичний і методичний матеріал з виконання лабораторних робіт з дослідження напівпровідникових приладів та електронних пристроїв: випрямних діодів, стабілітронів, біполярних та польових транзисторів, тиристорів, підсилювачів електричних сигналів, генераторів гармонійних коливань та імпульсних сигналів, випрямлячів, згладжувальних фільтрів, стабілізаторів напруги, керованих випрямлячів, конверторів.

Застосування комп'ютерних технологій в навчальному процесі, у тому числі і при вивченні електроніки, сприяє підвищенню якості підготовки фахівців. В даний час для моделювання аналогових і цифрових електронних пристроїв різного призначення використовуються такі програми, як Proteus, Micro-Cap, LabView, AutoCAD Electrical, Electronics Workbench, Multisim National Instruments, LTspice, EasyEDA і ін. Як основний інструментарій авторами вибрана система автоматизованого проектування і розробки електронних схем – програма Multisim National Instruments, як одна з найбільш відомих і функціональних.

Автори сподіваються, що наведений матеріал допоможе студентам краще засвоїти курс навчальної дисципліни «Електроніка та мікросхемотехніка», набути практичних навичок з моделювання і дослідження електронних схем.

# 1 ВИПРЯМНІ ДІОДИ І СТАБІЛІТРОНИ

**Мета роботи:** вивчення будови, принципу дії, вольт-амперних характеристик (ВАХ) випрямних діодів і стабілітронів. Дослідження найпростіших електричних кіл з випрямними діодами і стабілітронами.

## 1.1 Загальні теоретичні відомості

**Напівпровідниковий діод** – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом і двома виводами (анодом і катодом), в якому використовуються властивості  $p$ - $n$  переходу.

Напівпровідникові діоди класифікуються:

- за призначенням: випрямні, високочастотні і надвисокочастотні, імпульсні, тунельні, обернені, напівпровідникові стабілітрони, варикапи та ін.;
- за конструкцією: площинні і точкові;
- за типом матеріалу: германієві, кремнієві, арсеніде-галієві та ін.

**Випрямний напівпровідниковий діод** – це напівпровідниковий прилад, який призначений для перетворення змінного струму в постійний.

У основі роботи випрямних діодів лежить властивість односторонньої провідності  $p$ - $n$  переходу, яка полягає в тому, що останній добре проводить струм (має малий опір) при прямому включенні і практично не проводить струм (має дуже високий опір) при зворотному включенні.

Якщо позитивний полюс зовнішнього джерела напруги прикладений до *анода*, а негативний – до катоду діода, таке включення називається *прямим*, а напруга  $U_{\text{пр}}$  – *прямою*. При зворотному включенні полярність напруги змінюється на зворотну  $U_{\text{зв}}$ .

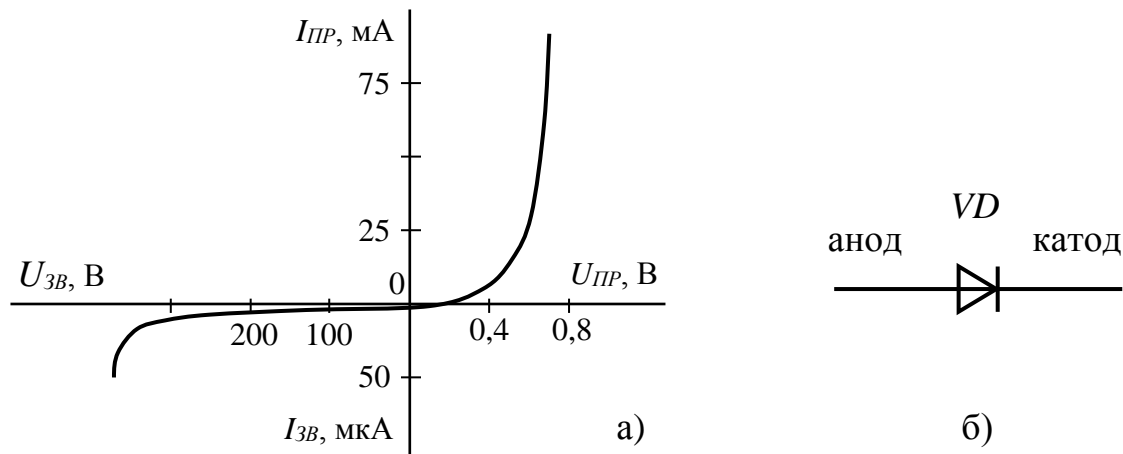
Прямий струм діода  $I_{\text{пр}}$  утворюється основними, а зворотний  $I_{\text{зв}}$  – неосновними носіями заряду.

Основні параметри випрямних напівпровідникових діодів:

- прямий струм діода  $I_{\text{пр}}$  при певній прямій напрузі (звичайно  $U_{\text{пр}} = 0,8 \dots 1,2$  В для кремнієвих діодів);
- максимально допустимий прямий струм  $I_{\text{пр.мак}}$  діода;
- максимально допустима зворотна напруга діода  $U_{\text{зв.мак}}$  (звичайно  $U_{\text{зв.мак}} = 100 \dots 400$  В для кремнієвих діодів);
- постійний зворотний струм  $I_{\text{зв}}$ , що тече через діод при зворотній напрузі  $U_{\text{зв.мак}}$ ;
- максимально допустима потужність  $P_{\text{мак}}$ , що розсіюється діодом.

За значенням максимально допустимого прямого струму випрямні діоди поділяються на малопотужні ( $I_{\text{ПР.мах}} \leq 0,3 \text{ A}$ ), середньої потужності ( $0,3 \text{ A} < I_{\text{ПР.мах}} \leq 10 \text{ A}$ ) і великої потужності ( $I_{\text{ПР.мах}} > 10 \text{ A}$ ).

Властивості випрямного діода ілюструються його ВАХ, яка є залежністю струму, що протікає через  $p$ - $n$  перехід від прикладеної зовнішньої напруги  $I = f(U)$  (рисунок 1.1).



а) типова ВАХ; б) умовне графічне позначення

Рисунок 1.1 – Випрямний діод

Вибір випрямного діода за довідковими даними здійснюється за струмом  $I_{\text{ПР.мах}}$  і напругою  $U_{3B.\text{мах}}$ .

У випадку коли потрібно збільшити прямий струм, що перевищує граничний допустимий струм одного діода, вони з'єднуються паралельно згідно (рисунок 1.2, а). Струм ланцюга при паралельному включенні діодів

$$I_{\text{ПР}} = I_{\text{ПР1}} + I_{\text{ПР2}}.$$

Зустрічно-паралельне з'єднання діодів (рисунок 1.2, б) застосовують для двостороннього обмеження вхідного сигналу за рівнем близько 1 В, наприклад, для захисту входу підсилювача.

Послідовне з'єднання (рисунок 1.3) діодів застосовують для збільшення сумарної допустимої зворотної напруги. Зворотна напруга кола при послідовному включенні діодів

$$U_{3B} = U_{3B1} + U_{3B2}.$$

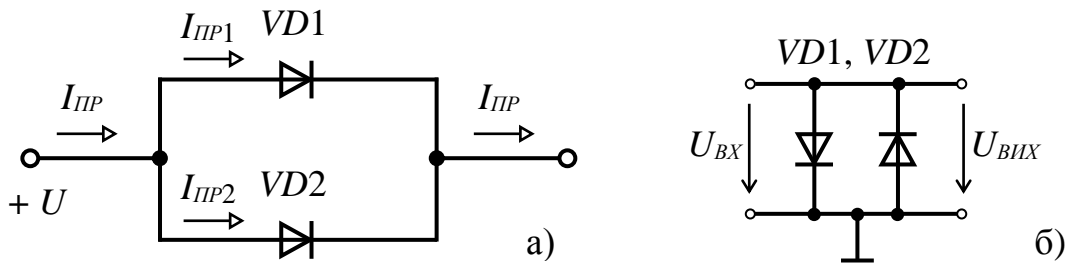


Рисунок 1.2 – Паралельне включення діодів

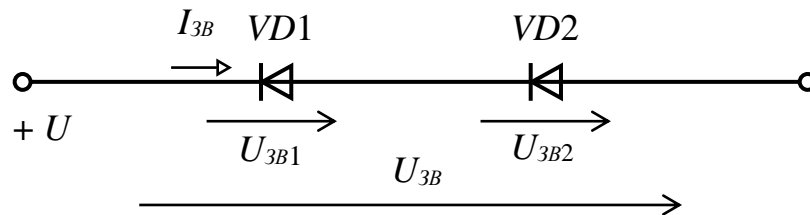


Рисунок 1.3 – Послідовне включення діодів

Випрямні діоди застосовуються для випрямлення змінного струму (перетворення змінного струму в постійний); використовуються в схемах управління і комутації для обмеження паразитних викидів напруги, як елементи електричної розв'язки електричних кіл тощо.

**Напівпровідниковий стабілітрон** – це напівпровідниковий прилад, напруга на якому в області електричного пробоя слабо залежить від струму і який використовується для стабілізації (підтримки незмінного рівня) напруги.

В напівпровідникових стабілітронах використовується властивість незначної зміни зворотної напруги на  $p-n$  переході при електричному пробойі. Ділянка електричного пробоя відповідає прикладеній до  $p-n$  переходу зворотній напрузі, тому нормальне включення стабілітрона – зворотне й використовується його зворотна гілка ВАХ (рисунок 1.4). Прямая гілка ВАХ стабілітрона аналогічна ВАХ випрямного діода.

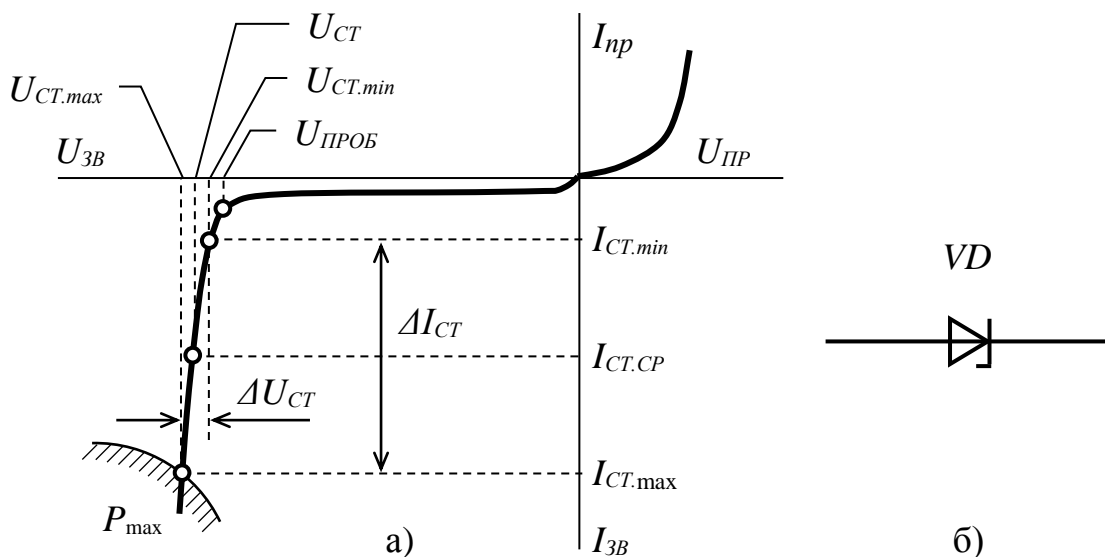
Основні параметри стабілітронів:

- напруга стабілізації  $U_{CT}$ ;
- мінімальний  $I_{CT.min}$  і максимальний  $I_{CT.max}$  струми стабілізації;
- максимально припустима потужність, що розсіюється  $P_{max}$ ;
- диференційний опір, що визначає крутість ВАХ в області електричного пробоя

$$r_D = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}};$$

- температурний коефіцієнт напруги на ділянці стабілізації

$$TKU = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta T \cdot U_{CT}} \cdot 100\% .$$



а) ВАХ; б) умовне графічне позначення

Рисунок 1.4 – Стабілітрон

Стабілітрони допускають послідовне включення, при цьому результуюча напруга стабілізації дорівнює сумі напруг стабілітронів:

$$U_{CT} = U_{CT1} + U_{CT2} .$$

Паралельне з'єднання стабілітронів неприпустиме, тому що через розкид характеристик і параметрів із усіх паралельно з'єднаних стабілітронів струм буде протікати тільки в тому, який має найменшу опорну напругу  $U_{ст}$ , що спричинить перегрів стабілітрона й подальший його вихід з ладу.

Стабілітрони використовують для стабілізації напруги джерел живлення, а також для фіксації рівнів напруги в різних схемах.

## 1.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення та умовне графічне позначення випрямного діода і стабілітрона.



2. Привести конструкцію та описати принцип дії випрямного діода і стабілітрона.

3. Привести ВАХ випрямного діода і стабілітрона.

4. Привести схему, що складається з послідовно увімкнених випрямного діода  $VD$  і резистора  $R$ .

5. Побудувати графіки зміни в часі (часові діаграми) напруг на випрямному діоді  $u_{VD} = f(t)$  і резисторі  $u_R = f(t)$  при синусоїдальній вхідній напрузі  $u_{BX} = f(t)$ .

**Вихідні дані:** амплітудне значення вхідної напруги  $U_{m.BX}$ , напруга на діоді при прямому включенні  $U_{пр}$ , опір резистора  $R$ . Варіанти завдань наведені в таблиці. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

№ вар.	Для діода		Для стабілітрона		№ вар.	Для діода		Для стабілітрона	
	$U_{m.BX}$ , В	$R$ , Ом	$U_{m.BX}$ , В	$R$ , Ом		$U_{m.BX}$ , В	$R$ , Ом	$U_{m.BX}$ , В	$R$ , Ом
1	10	10	6	0,2	16	29	16	21	3,2
2	12	20	7	0,4	17	27	14	22	3,4
3	14	30	8	0,6	18	25	12	23	3,6
4	16	40	9	0,8	19	23	10	24	3,8
5	18	50	10	1,0	20	21	11	25	4,0
6	20	45	11	1,2	21	19	13	6	0,3
7	22	35	12	1,4	22	17	15	7	0,5
8	24	25	13	1,6	23	15	17	8	0,7
9	26	11	14	1,8	24	13	19	9	0,9
10	28	13	15	2,0	25	11	10	10	1,1
11	30	15	16	2,2	26	9	11	11	1,3
12	32	17	17	2,4	27	7	12	12	1,5
13	34	19	18	2,6	28	5	13	13	1,7
14	33	20	19	2,8	29	8	14	14	1,9
15	31	18	20	3,0	30	6	15	15	2,1

**Примітка:** падіння напруги на діоді 1N4001 при прямому включенні  $U_{пр} = 1,35$  В; напруга стабілізації стабілітрона 1N4733  $U_{ст} = 5,1$  В.

6. Привести схему, що складається з послідовно увімкнених резистора  $R$  і стабілітрона  $VD$ .

7. Побудувати графіки зміни в часі (часові діаграми) напруг на резисторі  $u_R = f(t)$  і стабілітроні  $u_{VD} = f(t)$  при синусоїдальній вхідній напрузі  $u_{BX} = f(t)$ .

**Вихідні дані:** амплітудне значення вхідної напруги  $U_{m.BX}$ , напруга стабілізації стабілітрона  $U_{CT}$ , опір резистора  $R$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 1.1.

### 1.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для зняття ВАХ випрямного діода (рисунок 1.5).

2. Включити схему. Змінюючи напругу джерела живлення  $E$  зняти пряму  $I_{IP} = f(U_{IP})$  і зворотну  $I_{ЗВ} = f(U_{ЗВ})$  ВАХ випрямного діода. Результати вимірів занести в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати експериментальних досліджень випрямного діода

Пряма частина ВАХ випрямного діода							
$E, В$	0	0,5	1	2	3	4	5
$U_{IP}, В$							
$I_{IP}, мА$							
Зворотна частина ВАХ випрямного діода							
$E, В$	0	5	10	15	20		
$U_{ЗВ}, В$							
$I_{ЗВ}, мА$							

Таблиця 1.3 – Результати експериментальних досліджень стабілітрона

Пряма частина ВАХ стабілітрона							
$E, В$	0	0,5	1	2	3	4	5
$U_{IP}, В$							
$I_{IP}, мА$							
Зворотна частина ВАХ стабілітрона							
$E, В$	0	4	6	10	15	20	25
$U_{ЗВ}, В$							
$I_{ЗВ}, мА$							

3. За даними таблиці 1.2 побудувати ВАХ випрямного діода  $I = f(U)$ .

4. Набрати схему для зняття ВАХ стабілітрона (рисунок 1.6).

5. Включити схему. Змінюючи напругу джерела живлення  $E$  зняти пряму  $I_{IP} = f(U_{IP})$  і зворотну  $I_{ЗВ} = f(U_{ЗВ})$  частину ВАХ стабілітрона. Результати вимірів занести в таблицю 1.3.

6. За даними таблиці 1.3 побудувати ВАХ стабілітрона  $I = f(U)$ .

7. Набрати схему для дослідження електричного кола з випрямним діодом (рисунок 1.7, а).

8. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця 1.1).

9. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

10. Включити схему. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити амплітуди входної напруги  $U_{м.ВХ}$  і напруги на навантажувальному резисторі  $U_{м.Р}$ . За різницею амплітуд обчислити падіння напруги на діоді  $U_{IP}$ . Привести осцилограми напруг (рисунок 1.8).

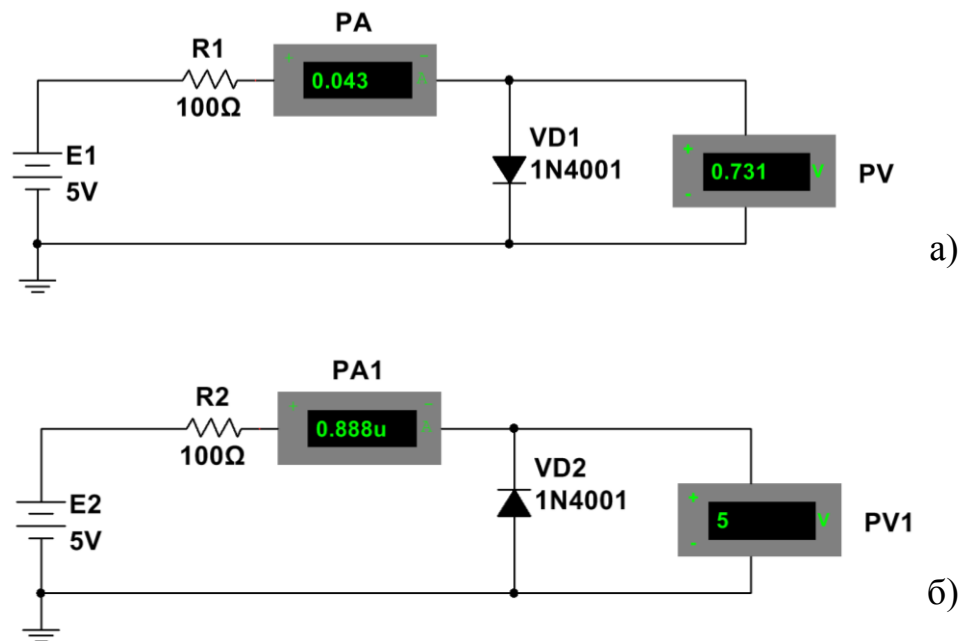
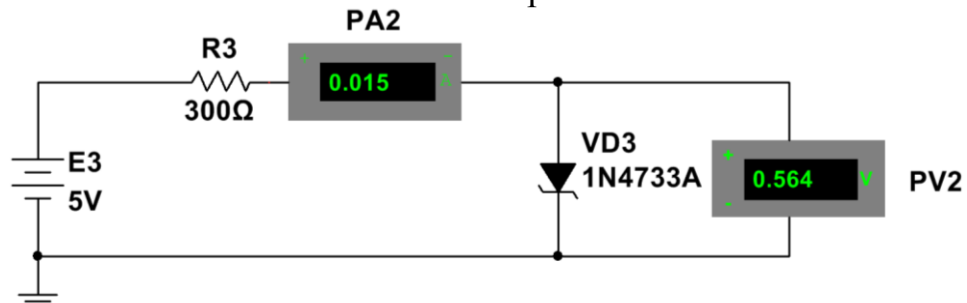


Рисунок 1.5 – Схема для зняття ВАХ випрямного діода

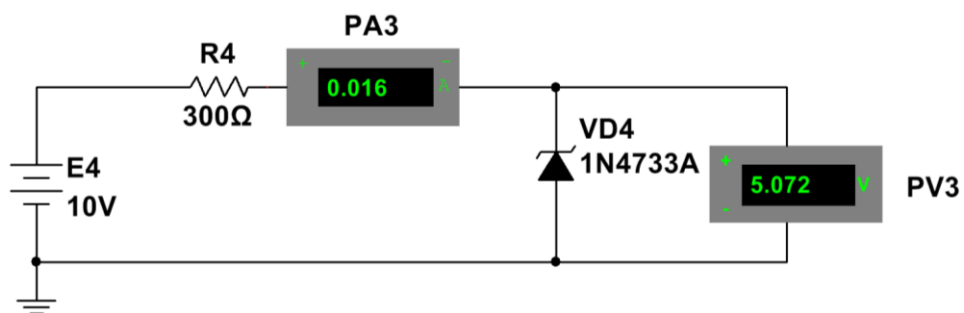
11. Набрати схему для дослідження електричного кола з стабілітроном (рисунок 1.7, б).

12. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця 1.1).

13. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.



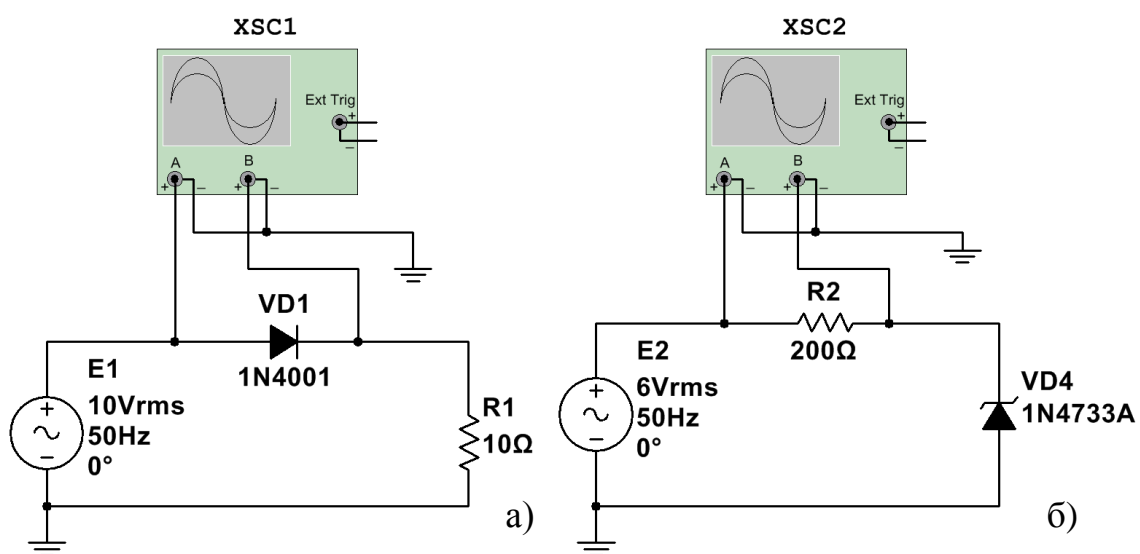
а)



б)

а) прямої частини; б) зворотної частини

Рисунок 1.6 – Схема для зняття ВАХ стабілітрона



а) з випрямним діодом; б) з стабілітроном

Рисунок 1.7 – Схема для дослідження електричних кіл

14. Включити схему. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити амплітуду вхідної напруги  $U_{m,BX}$  і напруги стабілізації стабілітрона  $U_{CT}$ . Привести осцилограми напруг (рисунок 1.9).

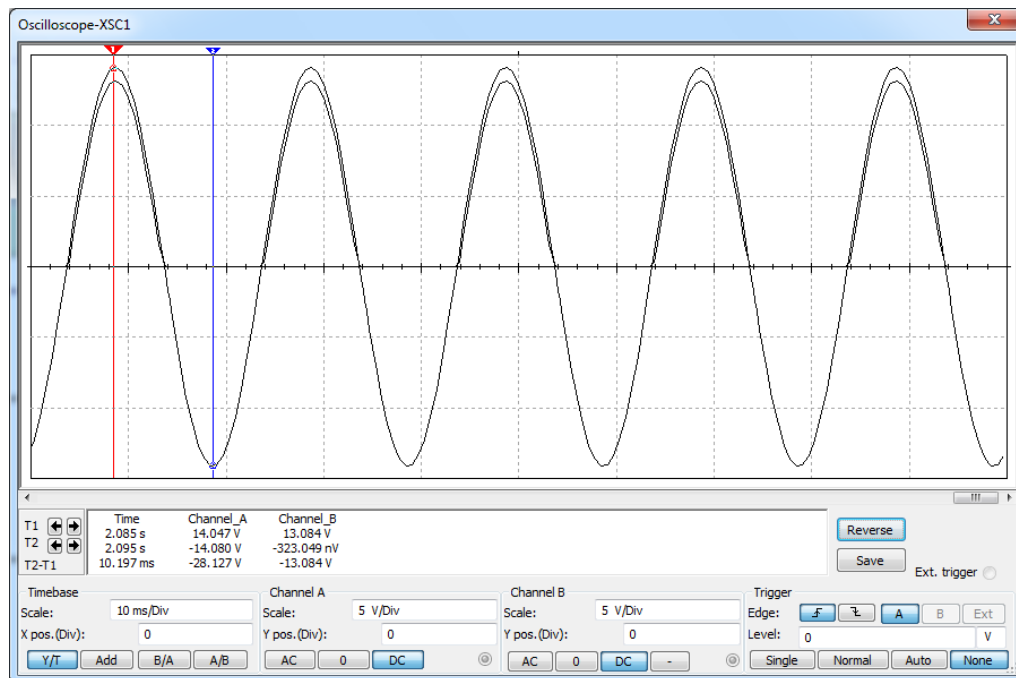


Рисунок 1.8 – Осцилограми напруг електричного кола з випрямним діодом

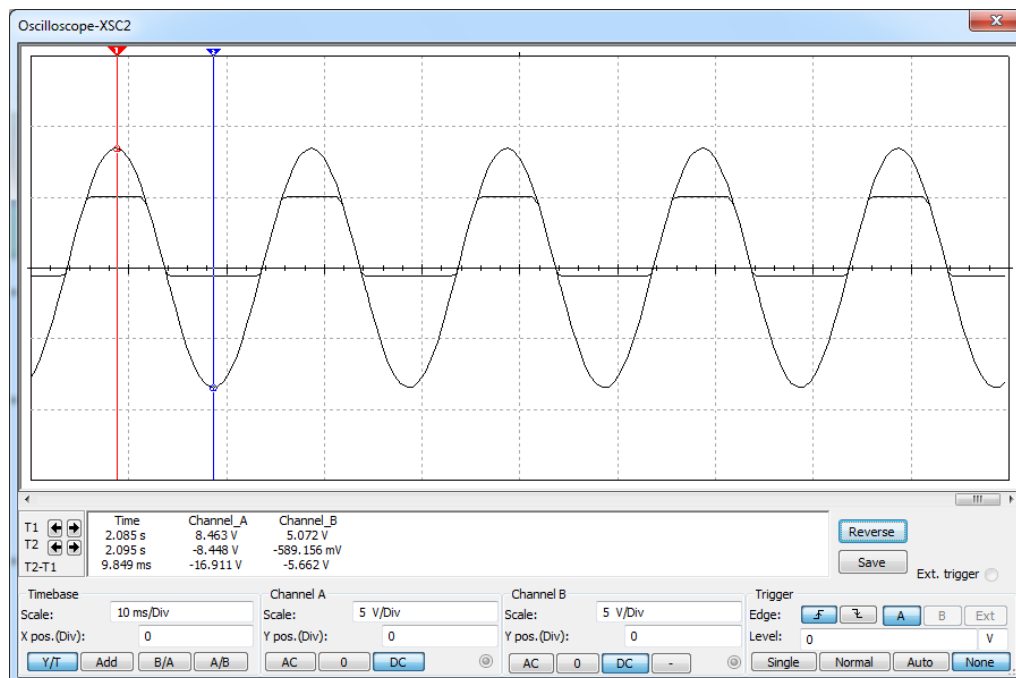


Рисунок 1.9 – Осцилограми напруг електричного кола з стабілітроном

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення та принцип дії напівпровідникових випрямних діодів.
2. Приведіть умовне графічне позначення випрямного діода.
3. Наведіть ВАХ випрямного діода.
4. Назвіть основні параметри випрямного діода.
5. В якому випадку випрямні діоди вмикаються послідовно?
6. В якому випадку випрямні діоди вмикаються паралельно?
7. Відомо, що  $U = 15$  В (рисунок 1.10). Визначити напругу на діоді  $U_{VD}$ .

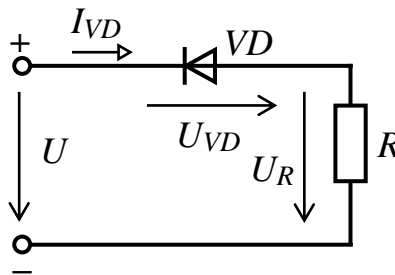


Рисунок 1.10

8. Відомо, що  $U = 20$  В (рисунок 1.11). Визначити напругу на резисторі  $U_R$ .

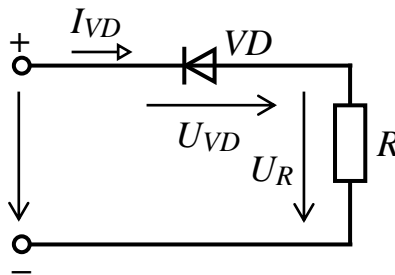


Рисунок 1.11

9. Як необхідно вмикати в електричне коло два однотипних випрямних діоди, які розраховані на максимально допустимий струм 100 мА кожний, якщо в колі протікає струм  $I = 150$  мА?

10. Випрямні діоди типу КД103А мають максимальну зворотну напругу  $U_{зв} = 50$  В. Як необхідно вмикати такі діоди в електричне коло, до якого підведена напруга  $U = 80$  В?
11. Яке призначення напівпровідникового стабілітрона?
12. Приведіть умовне графічне позначення стабілітрона.
13. Наведіть ВАХ стабілітрона.
14. Назвіть основні параметри стабілітрона.
15. Відомо, що  $U = 15$  В;  $U_{СТ} = 3$  В. Визначити напругу на резисторі  $U_R$  (рисунок 1.12). Поясніть призначення резистора  $R$ .

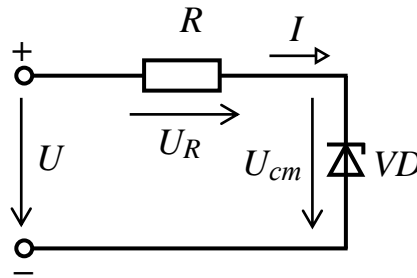


Рисунок 1.12

16. Відомо, що  $U = 20$  В;  $U_{СТ} = 3$  В (рисунок 1.13). Визначити напругу на стабілітроні  $U_{VD}$ .

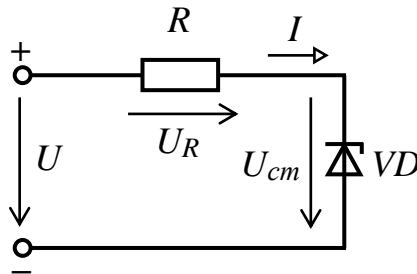


Рисунок 1.13

17. Поясніть, коли застосовується послідовне з'єднання стабілітронів. Чи можна вмикати паралельно два стабілітрони?
18. Яку напругу можна стабілізувати на навантаженні при послідовному вмиканні двох стабілітронів типу Д814Г, кожний з яких має напругу стабілізації  $U_{СТ} = 10...12$  В?

## 2 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ

**Мета роботи:** вивчення будови, принципу дії, вольт-амперних характеристик (ВАХ) біполярних транзисторів. Дослідження електричних кіл постійного струму з біполярними транзисторами.

## 2.1 Загальні теоретичні відомості

**Біполярний транзистор** – це напівпровідниковий прилад, що складається з трьох областей провідності, які утворюють два  $p$ - $n$  переходи і призначений для підсилення потужності.

Біполярні транзистори класифікуються за наступними ознаками:

- за матеріалом: германієві і кремнієві;
- за видом провідності областей: типу  $p$ - $n$ - $p$  і  $n$ - $p$ - $n$ ;
- за потужністю: малої ( $P_{\max} \leq 0,3$  Вт), середньої ( $0,3$  Вт  $< P_{\max} \leq 1,5$  Вт) і великої потужності ( $P_{\max} > 1,5$  Вт);
- за частотою: низькочастотні, середньочастотні, високочастотні і понадвисокочастотні.

У біполярних транзисторах струм визначається рухом носіїв заряду двох типів: електронів і дірок (або основними і неосновними носіями заряду). Звідси їх назва – біполярні.

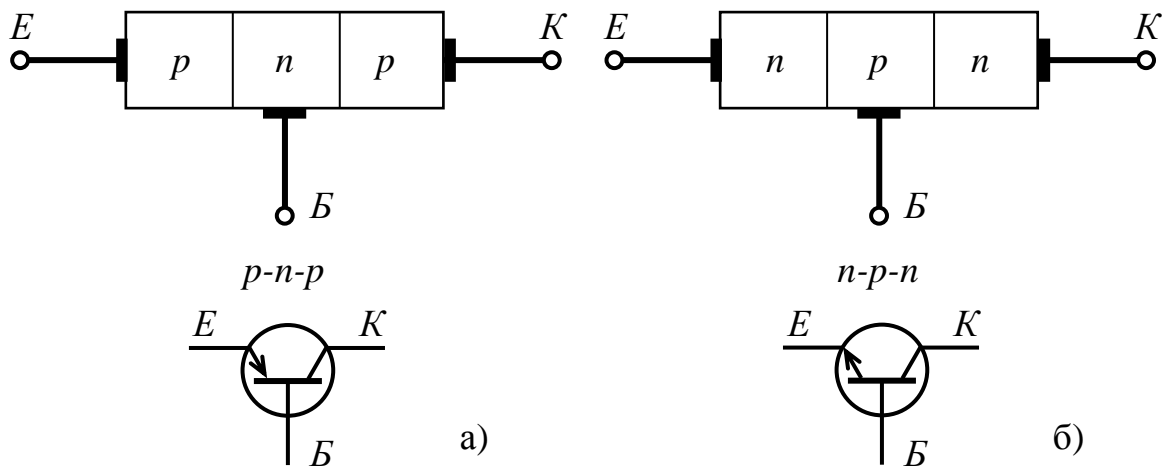
Структура біполярного транзистора схематично зображена на рисунку 2.1. Транзистор являє собою пластинку германію або кремнію, в якій утворено три області з різною електропровідністю. Середня область транзистора називається базою, одна крайня область – емітером, інша – колектором. Таким чином в транзисторі є два  $p$ - $n$  переходи: емітерний – між емітером і базою та колекторний – між базою і колектором.

Емітером називається область транзистора, яка призначена для інжекції носіїв заряду в базу. Колектором називають область, що призначена для екстракції носіїв заряду з бази. База – область, в яку емітером інжектуються неосновні для цієї області носії заряду.

Від бази, емітера і колектора зроблені виводи. Залежно від того, який з виводів є спільним для вхідного і вихідного електричних кіл, розрізняють три схеми вмикання біполярного транзистора (рисунок 2.1): з спільною базою (СБ), з спільним емітером (СЕ), з спільним колектором (СК).

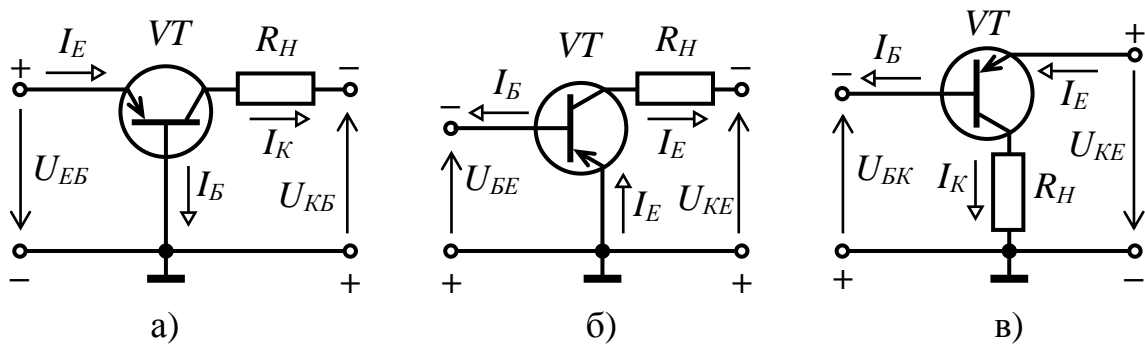
Вхідне (керуюче) коло служить для управління роботою транзистора. У вихідному (керованому) колі отримують посилені електричні коливання сигналу. Джерело посилюваних коливань вмикається у вхідне коло, а у вихідне вмикається навантаження.





а – тип  $p-n-p$ ; б – тип  $n-p-n$

Рисунок 2.1 – Структура та умовне позначення біполярного транзистора



а – з спільною базою; б – з спільним емітером;  
в – з спільним колектором

Рисунок 2.2 – Схеми вмикання біполярних транзисторів

В транзисторі протікає три струми: емітера, колектора і бази. Струм емітера розділяється на струми бази і колектора, тобто

$$I_E = I_B + I_K. \quad (2.1)$$

Для схеми з спільною базою струм емітера є вхідним струмом, струм колектора – вихідним. Вихідний струм складає частину вхідного, тобто

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_E, \quad (2.2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт передачі струму для схеми з СБ;

Оскільки вихідний струм менше вхідного, то коефіцієнт  $\alpha < 1$  (звичайно  $\alpha = 0,95 \dots 0,995$ ).

У схемі з спільним емітером вихідним струмом є струм колектора, а вхідним – струм бази. Коефіцієнт підсилення за струмом для схеми з СЕ:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}, \quad (2.3)$$

але  $\Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_K = \Delta I_E - \alpha \Delta I_E = \Delta I_E (1 - \alpha)$ ,  
тоді

$$\beta = \frac{\alpha \Delta I_E}{\Delta I_E (1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (2.4)$$

Звичайно коефіцієнт  $\beta = 9 \dots 99$  і навіть більше.

Оскільки вихідний струм транзистора залежить від вхідного струму, тому транзистор є напівпровідниковим приладом, який керується струмом.

Зміни струму емітера  $I_E$ , що викликані зміною напруги емітерного  $p$ - $n$  переходу, повністю передаються в колекторне коло, викликаючи зміну струму колектора  $I_K$ . Оскільки напруга джерела живлення  $E_K$  значно більша напруги емітерного  $p$ - $n$  переходу, то і потужність, споживана у колі колектора  $P_K$ , буде значно більше потужності в колі емітера  $P_E$ . Таким чином, забезпечується можливість управління великою потужністю в колекторному колі транзистора за рахунок малої потужності, що витрачається в емітерному колі, тобто має місце посилення потужності.

За відсутності навантаження у вихідному колі транзистор знаходиться у статичному режимі роботи. Його робота описується статичними характеристиками (ВАХ), наприклад, для схеми вмикання з СЕ:

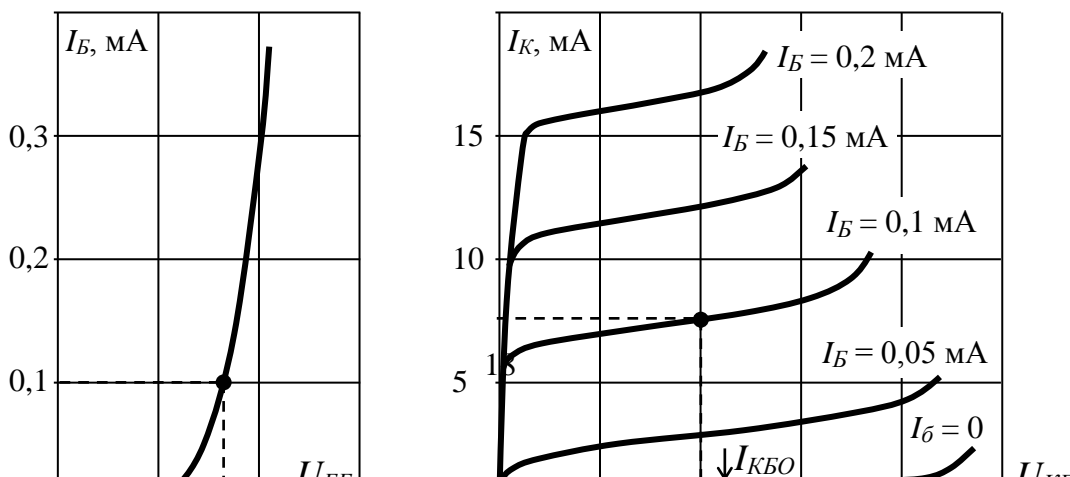
вхідною характеристикою (рисунк 2.3, а):

$$I_B = f(U_{BE}) \text{ при } U_{KE} = \text{const};$$

вихідною характеристикою (рисунк 2.3, б):

$$I_K = f(U_{KE}) \text{ при } I_B = \text{const}.$$

Електричний стан транзистора, увімкненого за схемою з СЕ, характеризується величинами  $I_B$ ,  $I_E$ ,  $I_K$ ,  $U_{BE}$ ,  $U_{KE}$ .



а – вхідна; б – вихідна

Рисунок 2.3 – Статичні характеристики біполярного транзистора, увімкненого за схемою з СЕ

Біполярний транзистор може працювати в трьох основних режимах, що визначаються полярністю напруги, прикладеної до емітерного та колекторного  $p-n$  переходів.

При роботі транзистора в **активному режимі** емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному.

У **режимі відтинання** (закритий стан транзистора), емітерний та колекторний переходи транзистора зміщені у зворотному напрямку (обидва  $p-n$  переходи закриті).

У **режимі насичення** (відкритий стан транзистора), емітерний та колекторний переходи транзистора зміщені у прямому напрямку (обидва  $p-n$  переходи відкриті).

Режим роботи, у якому транзистор тривалий час знаходиться в режимах відтинання або насичення, називається ключовим режимом.

У активному режимі транзистор працює як підсилювач сигналу, тобто виконує функції активного елементу електричної схеми (посилення, генерація і т.п.).

Біполярні транзистори є напівпровідниковими приладами універсального призначення і широко застосовуються в різних підсилювачах, генераторах, в імпульсних і ключових пристроях.

Основними елементами схеми (рисунок 2.4), що утворюють головне (вихідне) коло підсилювального каскаду, є джерело живлення  $E_K$ , керований елемент – транзистор  $VT$  і резистор  $R_K$ .

Решта елементів виконує допоміжну роль. Конденсатор  $C_P$  є розділяючим – за його відсутності через джерело вхідного сигналу протікав би постійний струм від джерела живлення підсилювача  $E_K$ .

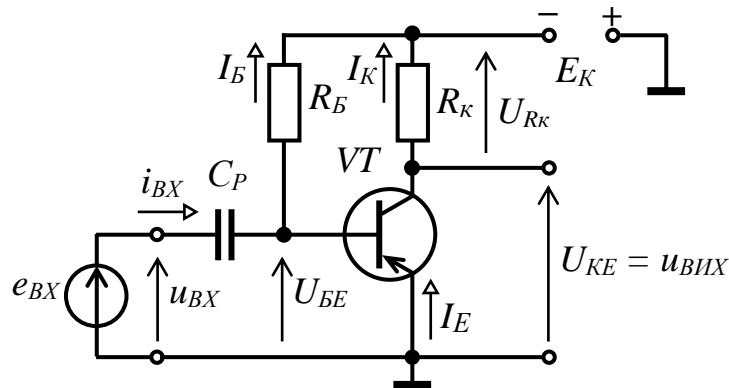


Рисунок 2.4 – Схема найпростішого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою з спільним емітером

Резистор  $R_B$ , увімкнений в коло бази, забезпечує роботу транзистора в режимі спокою, тобто при відсутності вхідного сигналу. Режим спокою забезпечується струмом бази спокою  $I_B \approx E_K / R_B$ .

За допомогою резистора  $R_K$  створюється вихідна напруга за рахунок протікання через нього вихідного струму  $I_K$ .

Для колекторного кола підсилювального каскаду за другим законом Кірхгофа можна записати рівняння електричного стану:

$$E_K = U_{KE} + I_K R_K, \quad (2.5)$$

тобто сума падіння напруги на резисторі  $R_K$  і напруги колектор-емітер  $U_{KE}$  транзистора завжди рівна постійній величині – ЕРС джерела живлення  $E_K$ .

Процес підсилення ґрунтується на перетворенні енергії джерела постійної напруги  $E_K$  в енергію змінної напруги у вихідному колі за рахунок зміни опору керованого елементу (транзистора) у відповідності до закону, за яким змінюється вхідний сигнал.

Розрахунок підсилювального каскаду (рисунок 2.4) виконується графо-аналітичним методом. Для цього на колекторних характеристиках транзистора (рисунок 2.5, б) з точки  $E_K$  необхідно провести ВАХ резистора  $R_K$ , що задовольняє рівнянню:

$$U_{KE} = E_K - R_K I_K. \quad (2.6)$$

Цю характеристику будують по двох точках:

- 1)  $U_{KE} = E_K$  при  $I_K = 0$  на осі абсцис;
- 2)  $I_K = E_K/R_K$  при  $U_{KE} = 0$  на осі ординат.

Побудовану таким чином ВАХ резистора  $R_K$  називають лінією навантаження за постійним струмом.

Точка перетину лінії навантаження з однією із статичних ВАХ транзистора називається робочою точкою. Початкове положення цієї точки за відсутності вхідного змінного сигналу називають точкою спокою –  $T_0$ . Точка спокою (робоча точка)  $T_0$  характеризується струмом  $I_{KC}$  і напругою  $U_{KEC}$  в режимі спокою.

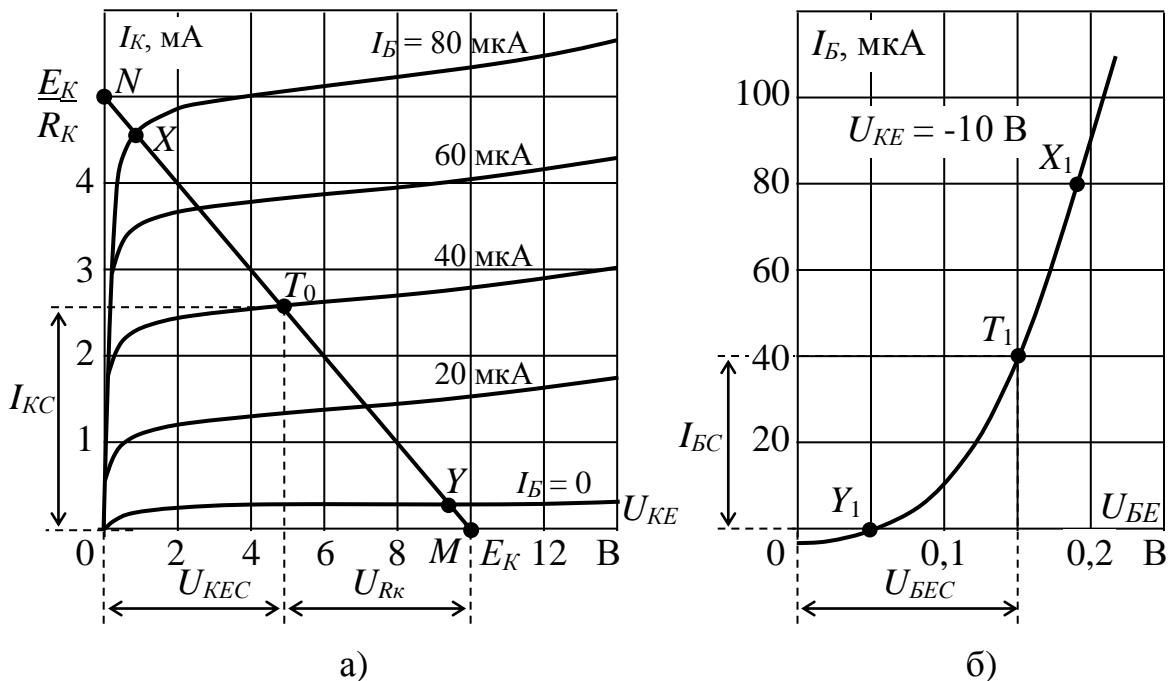


Рисунок 2.5 – Графо-аналітичний розрахунок робочого режиму транзистора за допомогою вихідних і вхідної характеристик

Опір резистора  $R_B$ , через який від джерела  $E_K$  подається постійна напруга на базу:

$$R_B = \frac{E_K - U_{BEC}}{I_{BC}}. \quad (2.7)$$

У активному (підсилювальному) режимі роботи точка спокою транзистора  $T_0$  знаходиться приблизно посередині ділянки АБ лінії навантаження.

## 2.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення, умовне графічне позначення та класифікацію біполярних транзисторів.

2. Привести конструкцію та описати принцип дії біполярного транзистора.

3. Побудувати вхідну  $I_B = f(U_{BE})$  і вихідну  $I_K = f(U_{KE})$  ВАХ біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером.

**Вихідні дані:** координати точок лінійної частини вхідної характеристики: точка 1 ( $I_B = 10$  мкА,  $U_{BE} = 0,6$  В), точка 2 ( $I_B = 100$  мкА,  $U_{BE} = 0,7$  В); коефіцієнт підсилення транзистора  $\beta$ , напруга джерела живлення  $E_K$ , опір резистора у колі колектора  $R_K$ . Струм колектора  $I_K = \beta \cdot I_B$  незначно збільшується при збільшенні  $E_K$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

№ вар.	$\beta$	$E_K$ , В	$R_K$ , кОм	№ вар.	$\beta$	$E_K$ , В	$R_K$ , кОм	№ вар.	$\beta$	$E_K$ , В	$R_K$ , кОм
1	176	8	0,5	11	184	18	0,9	21	183	17	0,7
2	178	9	0,6	12	182	19	1,0	22	185	18	0,8
3	180	10	0,7	13	180	20	1,0	23	187	19	0,9
4	182	11	0,8	14	178	10	0,9	24	189	20	1,0
5	184	12	0,9	15	176	11	0,8	25	187	10	0,5
6	186	13	1,0	16	174	12	0,7	26	185	11	0,6
7	188	14	0,5	17	175	13	0,6	27	183	12	0,7
8	190	15	0,6	18	177	14	0,5	28	181	13	0,8
9	188	16	0,7	19	179	15	0,5	29	179	14	0,9
10	186	17	0,8	20	181	16	0,6	30	177	15	1,0

4. Привести схему найпростішого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером. Описати призначення елементів схеми.

5. Побудувати лінію навантаження каскаду за постійним струмом та визначити параметри режиму спокою: напруга колектор-емітер спокою  $U_{KES}$ , струм колектора спокою  $I_{KS}$ , струм бази спокою  $I_{BS}$ , напруга база-емітер спокою  $U_{BES}$ . Робоча точка розташована посередині лінії навантаження.

6. Визначити величину опору резистора в колі бази  $R_B$ , який забезпечує режим спокою.

### 2.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для зняття ВАХ біполярного транзистора (рисунок 2.6).

2. Установити задані параметри елементів схеми.

3. Включити схему. Змінюючи струм бази зняти вхідну  $I_B = f(U_{BE})$  ВАХ транзистора при фіксованих значеннях напруги колектор-емітер:  $U_{KE} = 0$  та  $U_{KE} = 10$  В. Далі змінюючи величину напруги джерела живлення  $E_K$  зняти вихідну  $I_K = f(U_{KE})$  ВАХ біполярного транзистора при фіксованих значеннях струму бази:  $I_B = 10$  мкА; 50 мкА та 100 мкА. Результати вимірів занести в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати експериментальних досліджень біполярного транзистора

Вхідні ВАХ			Вихідні ВАХ			
$I_B$ , мкА	$U_{BE}$ , В		$E_K$ , В	$I_K$ , мА		
	$U_{KE} = 0$	$U_{KE} = 10$ В		$I_B = 10$ мкА	$I_B = 50$ мкА	$I_B = 100$ мкА
10			0,1			
30			0,2			
50			1,0			
70			10			
90			—			
100			—			

4. За даними таблиці 2.2 побудувати ВАХ біполярного транзистора:  $I_B = f(U_{BE})$  і  $I_K = f(U_{KE})$ .

5. Набрати схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (рисунок 2.7).

6. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця 2.1).

7. Включити схему. Змінюючи опір резистора  $R_B$ , установити параметри режиму спокою, величини яких визначені в п. 2.2.5. Записати показання приладів.

8. Змінюючи опір резистора  $R_B$  ( $R_B = 2R_B$ ;  $R_B = R_B/2$ ), записати показання приладів і провести аналіз отриманих результатів.

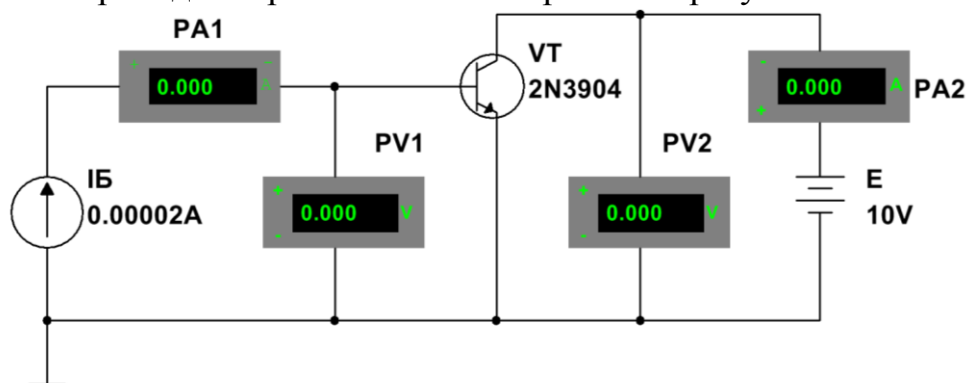


Рисунок 2.6 – Схема для зняття ВАХ біполярного транзистора, увімкненого за схемою з спільним емітером

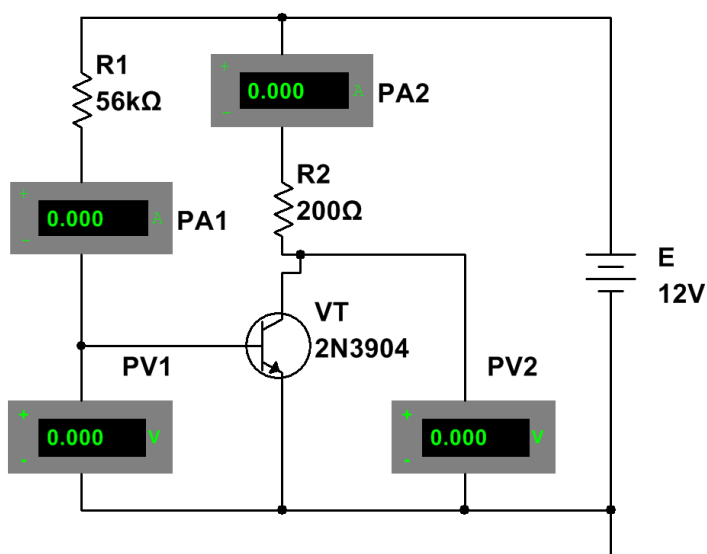


Рисунок 2.7 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі

### Контрольні питання

1. Що називають біполярним транзистором (БТ)?
2. Яке призначення має БТ?
3. Приведіть умовне графічне позначення БТ *p-n-p* типу.
4. Приведіть умовне графічне позначення БТ *n-p-n* типу.
5. Яку область БТ називають емітером?
6. Яку область БТ називають колектором?
7. Яку область БТ називають базою?
8. Приведіть зв'язок між струмами колектора, емітера і бази БТ.
9. Приведіть схему вмикання БТ з спільною базою (СБ).
10. Приведіть схему вмикання БТ з спільним емітером (СЕ).



11. Приведіть схему вмикання БТ з спільним колектором (СК).
12. Як визначається коефіцієнт передачі струму  $\alpha$  для схеми з СБ?
13. Чому дорівнює величини  $\alpha$  ?
14. Як визначається коефіцієнт підсилення струму  $\beta$  для схеми з СЕ?
15. Чому дорівнює величина  $\beta$  ?
16. Наведіть ВАХ БТ, увімкненого за схемою з СБ.
17. Наведіть ВАХ БТ, увімкненого за схемою з СЕ.
18. Визначить величину струму в колі бази  $I_B$ , якщо відомо, що струм колектора транзистора  $I_K = 0,1$  мА, а коефіцієнт підсилення транзистора за струмом  $\beta = 100$ .
19. Визначить величину струму в колі колектора  $I_K$ , якщо відомо, що струм бази транзистора  $I_B = 0,01$  мА, а коефіцієнт підсилення транзистора за струмом  $\beta = 100$ .
20. Визначить потужність колекторного переходу  $P_K$ , якщо відомо, що струм колектора транзистора  $I_K = 0,1$  А, а напруга між колектором і емітером дорівнює  $U_{KE} = 12$  В.
21. Як забезпечити активний режим роботи БТ?
22. Як забезпечити режим роботи відтинання БТ?
23. Як забезпечити режим роботи насичення БТ?
24. Яке призначення підсилювального каскаду?
25. Для чого призначений конденсатор  $C_P$  (рисунок 2.4)?
26. Для чого призначений резистор  $R_K$  (рисунок 2.4)?
27. Для чого призначений резистор  $R_B$  (рисунок 2.4)?
28. Для підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (рис. 2.4) визначить напругу колектор-емітер  $U_{KE}$ , якщо відомо, що струм колектора транзистора  $I_K = 15$  мА, величина опору резистора  $R_K = 1$  кОм, величина напруги джерела живлення  $E_K = 25$  В.
29. Для підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (рисунок 2.4) визначить опір резистора  $R_B$ , якщо відомо, що струм  $I_B = 10$  мА, величина напруги база-емітер  $U_{BE} = 1$  В, величина напруги джерела живлення  $E_K = 20$  В.
30. Для підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (рисунок 2.4) визначить опір резистора  $R_K$ , якщо відомо, що струм  $I_K = 12$  мА, величина напруги колектор-емітер  $U_{KE} = 11$  В, величина напруги джерела живлення  $E_K = 35$  В.
31. Для підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (рисунок 2.4) визначить напругу база-емітер  $U_{BE}$ , якщо відомо, що струм  $I_B = 0,1$  мА, величина опору резистора  $R_B = 100$  кОм, величина напруги джерела живлення  $E_K = 15$  В.

32. Відомо, що  $K_U = 25$ ,  $K_I = 100$ . Визначить коефіцієнт підсилення каскаду за потужністю  $K_P$ .

### 3 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

**Мета роботи:** вивчення будови, принципу дії, вольт-амперних характеристик (ВАХ) польових транзисторів. Дослідження електричних кіл постійного струму з польовими транзисторами.

#### 3.1 Загальні теоретичні відомості

**Польовий транзистор** – це електроперетворювальний прилад, в якому струм, що протікає через канал, керується електричним полем, яке виникає при прикладенні напруги між затвором і витоком, і призначений для підсилення потужності електромагнітних коливань.

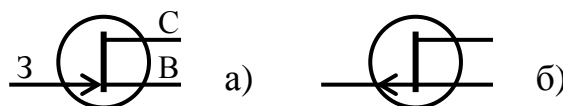
За способом створення каналу розрізняють польові транзистори із затвором у вигляді керуючого  $p$ - $n$  переходу і з ізольованим затвором (МДН- або МОН-транзистори): вбудованим каналом та індукованим каналом.

Залежно від провідності каналу польові транзистори поділяються на: польові транзистори з каналом  $p$ -типу і  $n$ -типу. Канал  $p$ -типу має діркову провідність, а канал  $n$ -типу – електронну.

**Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом** – це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу  $p$ - $n$  переходом, який увімкнений у зворотному напрямку (рисунк 3.1).

Каналом польового транзистора називають область в напівпровіднику, в якій струм основних носіїв заряду регулюється зміною її поперечного перетину.

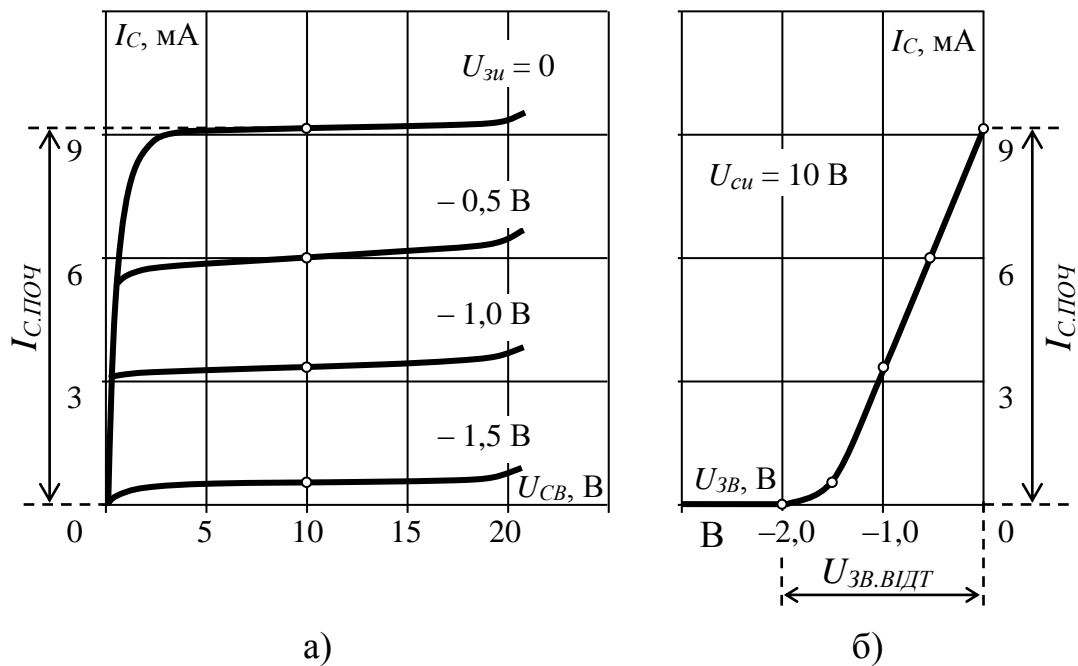
Електрод, через який в канал входять основні носії заряду, називають витоком. Електрод, через який з каналу виходять основні носії заряду, називають стоком. Електрод, призначений для регулювання поперечного перетину каналу за рахунок керуючої напруги, називають затвором.



а – канал  $n$ -типу; б – канал  $p$ -типу

Рисунок 3.1 – Умовне позначення польового транзистора з керуючим  $p$ - $n$  переходом

Стокові характеристики польового транзистора (рисунок 3.2, а) відображають залежність струму стоку  $I_C$  від напруги  $U_{CB}$  при фіксованій напрузі  $U_{3B}$ :  $I_C = f(U_{CB})$  при  $U_{3B} = \text{const}$ .



а – стокові (вихідні); б – стік-затворна

Рисунок 3.2 – ВАХ польового транзистора з  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу

Стік-затворна характеристика польового транзистора показує залежність струму  $I_C$  від напруги  $U_{3B}$  при фіксованій напрузі  $U_{CB}$ :  $I_C = f(U_{3B})$  при  $U_{CB} = \text{const}$  (рисунок 3.2, б).

При напрузі  $U_{3B} = 0$  перетин каналу найбільший, а його опір – найменший, тому струм  $I_C$  приймає найбільше значення. Струм стоку  $I_{C.Поч}$  при  $U_{3B} = 0$  називають початковим струмом стоку.

Напруга  $U_{3B}$ , при якій канал повністю перекривається, а струм стоку  $I_C$  стає дуже малим, називають напругою відтинання  $U_{3B.ВІДТ}$ .

Основні параметри транзистора:

- максимальний струм стоку  $I_{C \max}$  (при  $U_{3B} = 0$ );
- максимальна напруга стік-витік  $U_{CB \max}$ ;

- напруга відтинання  $U_{зв.відт}$ ;
- внутрішній (вихідний) опір  $r_i$  – опір транзистора між стоком і витоком (опір каналу) для змінного струму;
- крутизна стік-затворної характеристики:

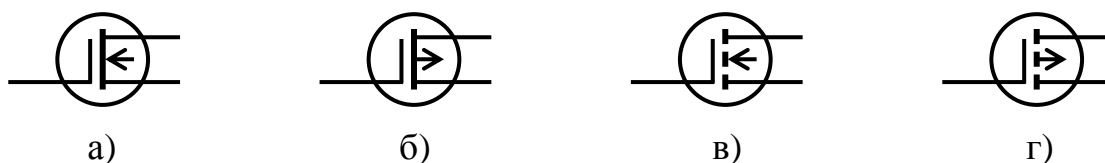
$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зв}} \text{ при } U_{CB} = \text{const}$$

відображає вплив напруги затвора на вихідний струм транзистора;

- вхідний опір транзистора  $r_{BX}$  визначається опором  $p$ - $n$  переходу, увімкненого у зворотному напрямку; у польових транзисторах з  $p$ - $n$  переходом має досить велику величину (досягає одиниць і десятків МОм).

**Польовий транзистор з ізолюваним затвором (МДН-транзистор)** – це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу шаром діелектрика.

МДН-транзистори виконують двох типів – з вбудованим та з індукованим каналом (рисунок 3.3).

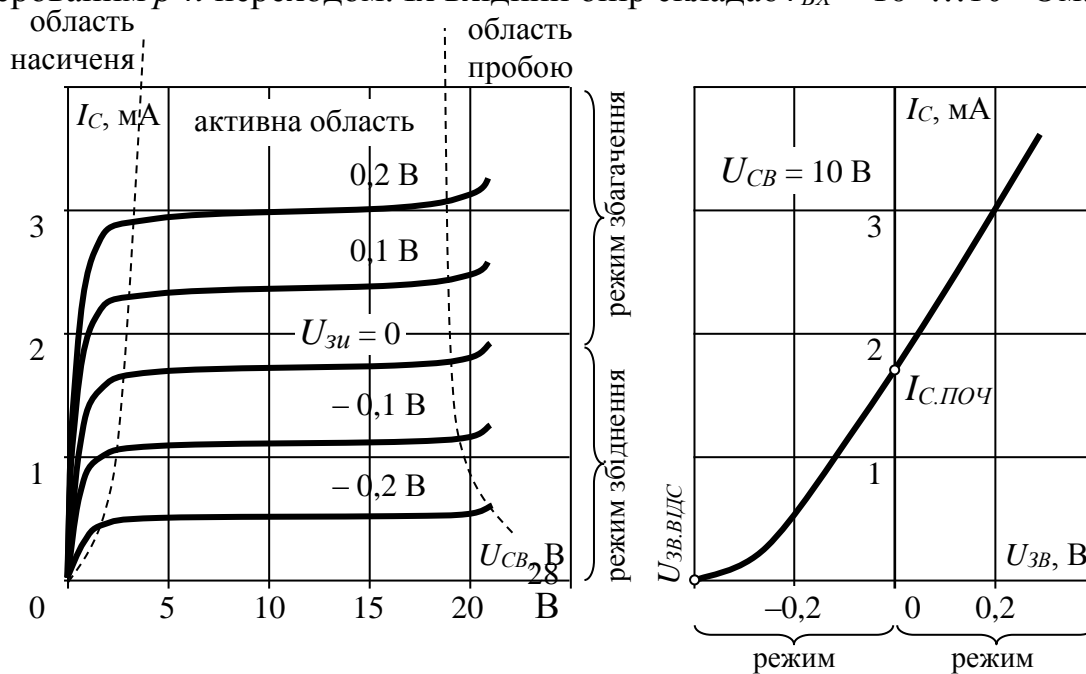


- а) з вбудованим каналом  $n$ -типу; б) з вбудованим каналом  $p$ -типу;  
в) з індукованим каналом  $n$ -типу; г) з індукованим каналом  $p$ -типу;

Рисунок 3.3 – Умовне позначення МДН-транзисторів

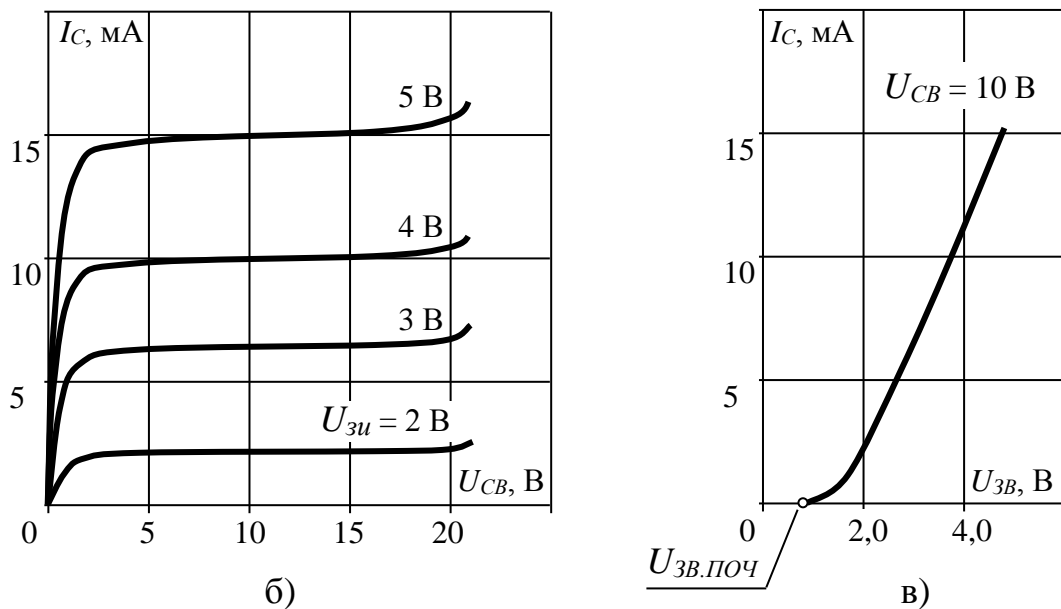
ВАХ МДН-транзисторів приведені на рисунках 3.4, 3.5.

Параметри МДН-транзисторів аналогічні параметрам польових транзисторів з керованим  $p$ - $n$  переходом. Що стосується вхідного опору, то МДН-транзистори мають кращі показники, ніж транзистори з керованим  $p$ - $n$  переходом. Їх вхідний опір складає  $r_{BX} = 10^{12} \dots 10^{14}$  Ом.



а – стокові; б – стік-затворна

Рисунок 3.4 – ВАХ МДН-транзистора з вбудованим каналом  $n$ -типу



б – стокові; в – стік-затворна

Рисунок 3.5 – ВАХ МДН-транзистора з індукованим каналом  $n$ -типу

Польові транзистори застосовуються в підсилювальних каскадах з великим входним опором, ключових і логічних пристроях, при виготовленні інтегральних схем та ін.

### 3.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення і класифікацію польових транзисторів.

2. Привести конструкцію, умовне графічне позначення та описати принцип дії польового транзистора з керованим  $p$ - $n$  переходом.

3. Побудувати стік-затворну ВАХ польового транзистора з керованим  $p$ - $n$  переходом за заданим значенням крутизни характеристики  $S$  і струму стоку  $I_{c.пoc.}$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

№ вар.	$S$ , мА/В	$I_{c.пoc.}$ , мА	$U_{зв.пoc.}$ , В	$E_c$ , В	$R_c$ , кОм	№ вар.	$S$ , мА/В	$I_{c.пoc.}$ , мА	$U_{зв.пoc.}$ , В	$E_c$ , В	$R_c$ , кОм
1	0,5	1,0	0,2	8	7	16	2,0	4,2	0,3	23	10
2	0,6	1,4	0,3	9	8	17	2,1	4,4	0,4	24	7
3	0,7	1,6	0,4	10	9	18	2,2	4,6	0,5	25	8
4	0,8	1,8	0,5	11	10	19	2,3	4,8	0,6	8	9
5	0,9	2,0	0,6	12	7	20	2,4	5,0	0,7	9	10
6	1,0	2,2	0,7	13	8	21	2,5	5,4	0,8	10	7
7	1,1	2,4	0,8	14	9	22	2,6	5,6	0,9	11	8
8	1,2	2,6	0,9	15	10	23	2,7	5,8	1,0	12	9
9	1,3	2,8	1,0	16	7	24	2,8	6,0	1,1	13	10
10	1,4	3,0	1,1	17	8	25	2,9	6,4	1,2	14	7
11	1,5	3,2	1,2	18	9	26	3,0	6,8	1,3	15	8
12	1,6	3,4	1,3	19	10	27	3,1	7,0	1,4	16	9
13	1,7	3,6	1,4	20	7	28	3,2	7,2	1,5	17	10
14	1,8	3,8	1,5	21	8	29	3,3	7,4	1,2	18	7
15	1,9	4,0	0,2	22	9	30	3,4	7,6	1,0	19	8

4. Привести конструкцію, умовне графічне позначення та описати принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором індукованим каналом.

5. Побудувати стік-затворну ВАХ польового транзистора з ізольованим затвором індукованим каналом за заданим значенням крутизни характеристики  $S$  і напруги  $U_{зв.пoc.}$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 3.1.

6. Привести конструкцію, умовне графічне позначення та описати принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором вбудованим каналом.

7. Привести стік-затворну ВАХ польового транзистора з ізольованим затвором вбудованим каналом за заданим значенням крутизни характеристики  $S$  і струму стоку  $I_{c.пoc.}$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 3.1.

8. Привести схеми найпростіших підсилювальних каскадів на польових транзисторах. Описати способи забезпечення режиму спокою.

### 3.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для зняття ВАХ польового транзистора з керованим  $p-n$  переходом (рисунок 3.6).
2. Установити задані параметри елементів схеми.

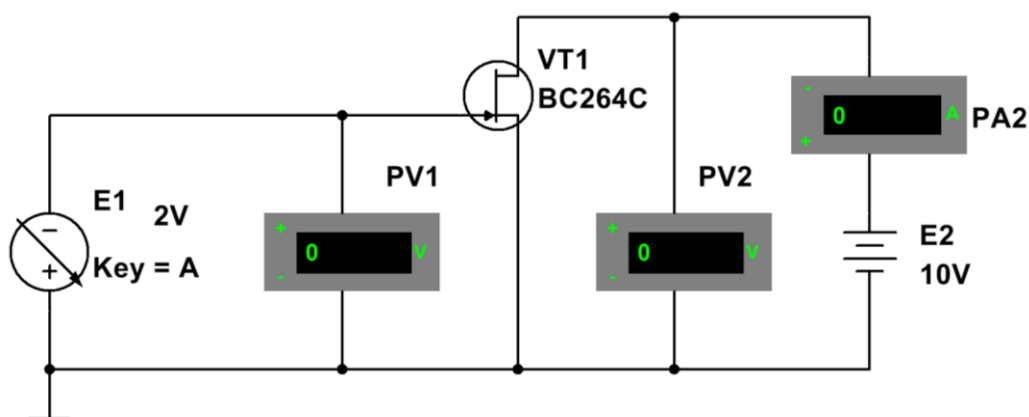


Рисунок 3.6 – Схема для зняття ВАХ польового транзистора з керованим  $p-n$  переходом

3. Включити схему. Змінюючи напругу затвор-витік  $U_{ЗВ}$  (при фіксованих значеннях напруги стік-витік  $U_{СВ} = \text{const}$ ) зняти стік-затворну ВАХ транзистора  $I_C = f(U_{ЗВ})$ . Далі змінюючи напругу  $U_{СВ}$  (при фіксованих значеннях напруги затвор-витік  $U_{ЗВ} = \text{const}$ ) зняти стокові ВАХ транзистора  $I_C = f(U_{СВ})$ . Результати вимірів струму стоку  $I_C$  занести в таблицю 3.2.

**Примітка:** величину напруги  $U_{ЗВ}$  змінювати за допомогою джерела живлення  $E1$ , величину напруги  $U_{СВ}$  – за допомогою джерела живлення  $E2$ .

Таблиця 3.2 – Результати експериментальних досліджень польового транзистора з керованим  $p-n$  переходом

Стік-затворні BAX			Стокові BAX			
$U_{3B}$ , В	$I_C$ , мА		$U_{CB}$ , В	$I_C$ , мА		
	$U_{CB} = 1\text{В}$	$U_{CB}=10\text{В}$		$U_{3B} = 0$	$U_{3B} = 1\text{В}$	$U_{3B} = 2\text{В}$
0			0,1			
0,5			0,2			
1,0			1,0			

1,5			10			
2,0			—			
2,5			—			

4. За даними таблиці 3.2 побудувати ВАХ польового транзистора з керованим  $p$ - $n$  переходом:  $I_C = f(U_{3B})$  і  $I_C = f(U_{CB})$ .

5. Набрати схему для зняття ВАХ польового МДН-транзистора з індукованим каналом (рисунок 3.7).

6. Установити задані параметри елементів схеми.

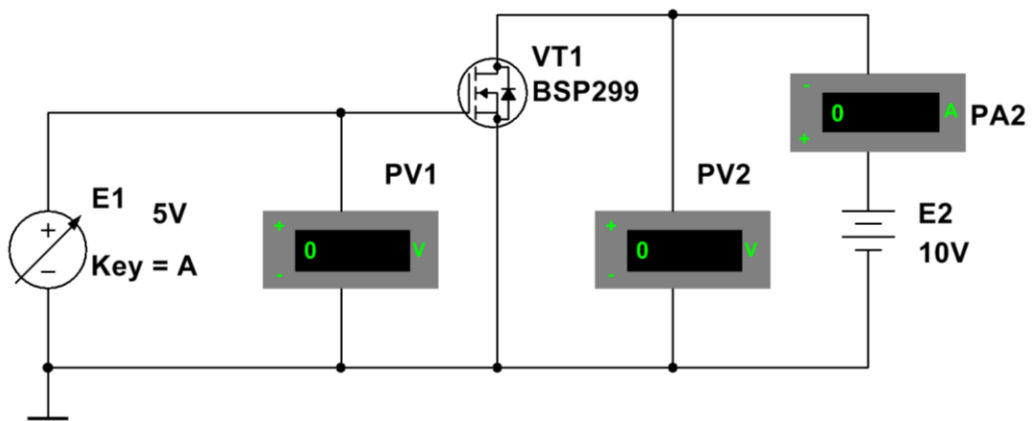


Рисунок 3.7 – Схема для зняття ВАХ польового МДН-транзистора з індукованим каналом

7. Включити схему. Змінюючи напругу затвор-витік  $U_{3B}$  (при фіксованих значеннях напруги стік-витік  $U_{CB} = \text{const}$ ) зняти стік-затворну ВАХ транзистора  $I_C = f(U_{3B})$  і, змінюючи напругу  $U_{CB}$  (при фіксованих значеннях напруги затвор-витік  $U_{3B} = \text{const}$ ) зняти стокові ВАХ транзистора  $I_C = f(U_{CB})$ . Результати вимірів струму стоку  $I_C$  занести в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати експериментальних досліджень польового МДН-транзистора з індукованим каналом

Стік-затворні ВАХ			Стокові ВАХ			
$U_{3B}$ , В	$I_C$ , мА		$U_{CB}$ , В	$I_C$ , мА		
	$U_{CB} = 1\text{В}$	$U_{CB}=10\text{В}$		$U_{3B} = 0$	$U_{3B} = 1\text{В}$	$U_{3B} = 2\text{В}$
1,0			0,1			
2,0			0,2			
5,0			1,0			
10			10			



15			–			
----	--	--	---	--	--	--

8. За даними таблиці 3.3 побудувати ВАХ польового транзистора з ізольованим затвором індукованим каналом:  $I_C = f(U_{3B})$  і  $I_C = f(U_{CB})$ .

9. Набрати схему найпростішого підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим  $p$ - $n$ -переходом (рисунок 3.6).

10. Установити задані параметри елементів схеми:  $E_C$  і  $R_C$  (таблиця 3.1),  $R_3 = 1$  МОм.

11. Включити схему. Резистором  $R_B$  установити режим спокою ( $U_{CB} \approx E_C/2$ ). Записати показання приладів і величину опору резистора  $R_B$ .

12. Набрати схему найпростішого підсилювального каскаду на польовому транзисторі з ізольованим затвором індукованим каналом (рисунок 3.8).

13. Установити задані параметри елементів схеми  $E_C$  і  $R_C$  (таблиця 3.1).

14. Включити схему. Підбором опорів резисторів  $R_{31}$  і  $R_{32}$  (десятки-сотні кОм) установити режим спокою ( $U_{CB} \approx E_C/2$ ). Записати показання приладів і величину опору резисторів  $R_{31}$  і  $R_{32}$ .

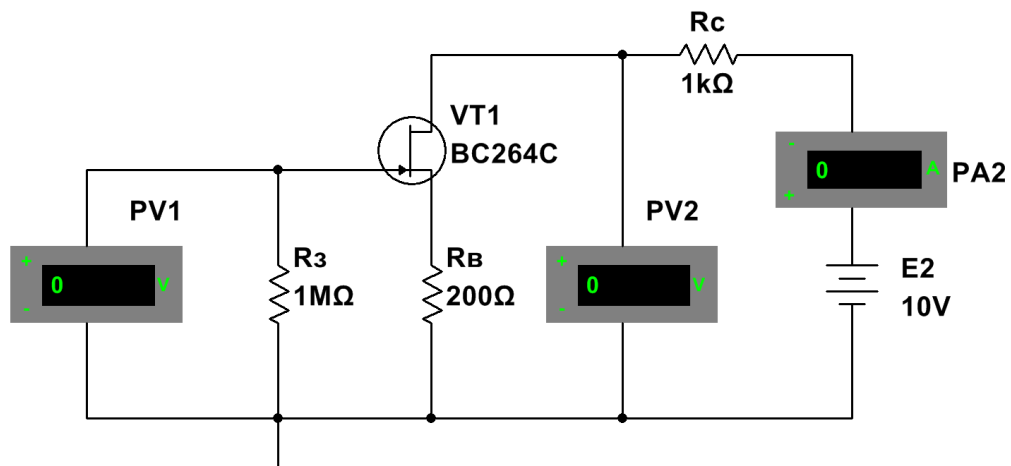


Рисунок 3.8 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим  $p$ - $n$  переходом

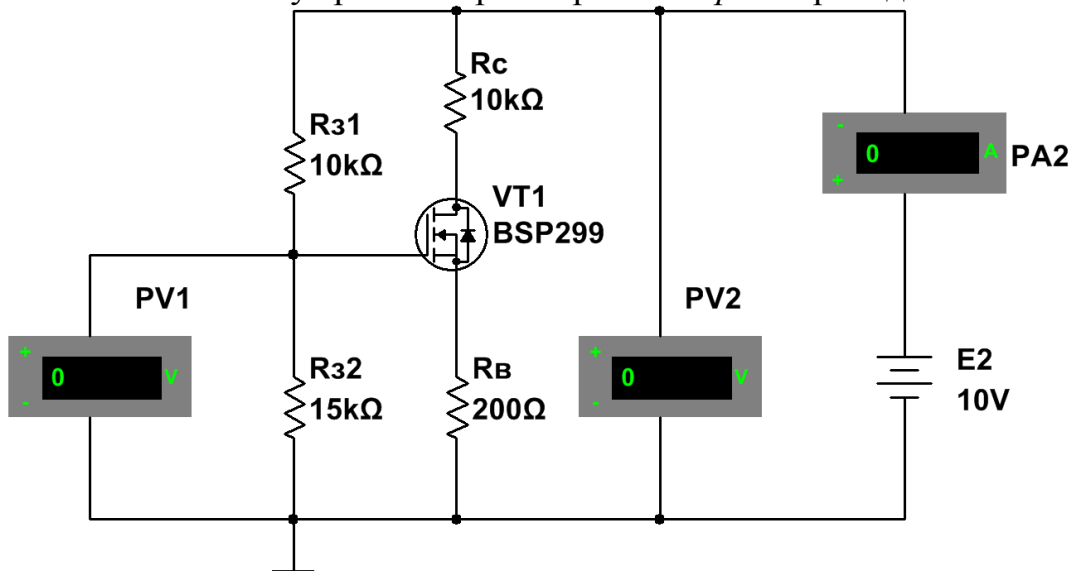


Рисунок 3.9 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на польовому МДН-транзисторі з індукованим каналом

### Контрольні питання

1. Що називають польовим транзистором (ПТ)?
2. Яке призначення має польовий транзистор?
3. Наведіть визначення ПТ з керуючим  $p-n$  переходом.
4. Приведіть умовне графічне позначення ПТ з керуючим  $p-n$  переходом.
5. Яку область ПТ називають каналом?
6. Який електрод ПТ називають витоком?
7. Який електрод ПТ називають стоком?
8. Який електрод ПТ називають затвором?
9. При якій напрузі через канал ПТ з керуючим  $p-n$  переходом протікає максимальний струм стоку?
10. При якій напрузі через канал ПТ з керуючим  $p-n$  переходом протікає мінімальний струм стоку?
11. Приведіть ВАХ ПТ з керуючим  $p-n$  переходом.
12. Як визначається крутизна стік-затворної характеристики ПТ?
13. Наведіть визначення ПТ з ізольованим затвором.
14. Приведіть ВАХ ПТ з ізольованим затвором вбудованим каналом.
15. Приведіть ВАХ ПТ з ізольованим затвором індукованим каналом.
16. Приведіть умовне графічне позначення МДН-транзистора з ізольованим затвором вбудованим каналом.
17. Приведіть умовне графічне позначення МДН-транзистора з ізольованим затвором індукованим каналом.
18. Приведіть схему увімкнення ПТ з спільним витоком.
19. Приведіть схему увімкнення ПТ з спільним затвором.
20. Приведіть схему увімкнення ПТ з спільним стоком.
21. Яке призначення підсилювального каскаду?
22. Який режим роботи підсилювача називають режимом спокою?
23. Для чого призначений конденсатор  $C_B$  (рисунок 3.10)?

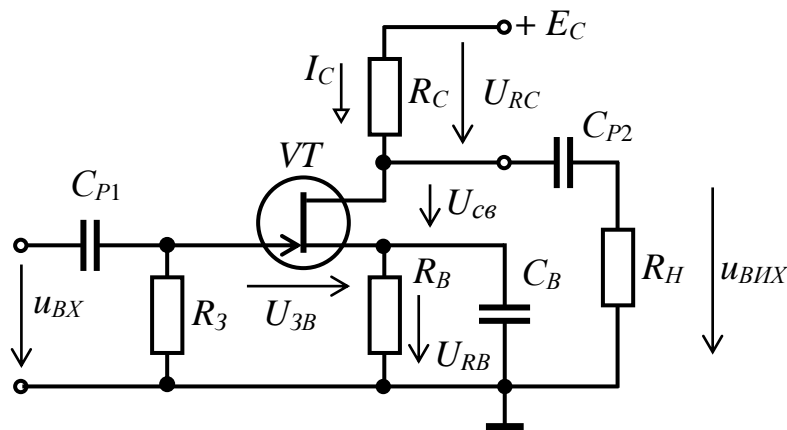


Рисунок 3.10

24. Для чого призначений резистор  $R_3$  (рисунок 3.10)?
25. Для чого призначений конденсатор  $C_P$  (рисунок 3.10)?
26. Для чого призначений резистор  $R_B$  (рисунок 3.10)?
27. Для чого призначений резистор  $R_C$  (рисунок 3.10)?
28. Поясніть методику побудови лінії навантаження підсилювального каскаду за постійним струмом та визначення параметрів режиму спокою.
29. Поясніть, як зміниться положення робочої точки і параметри режиму спокою підсилювального каскаду при зміні: величини опору резистора  $R_C$ ; напруги живлення  $E_C$ ; напруги  $U_{3B}$ ; крутизни ВАХ транзистора  $S$ ?

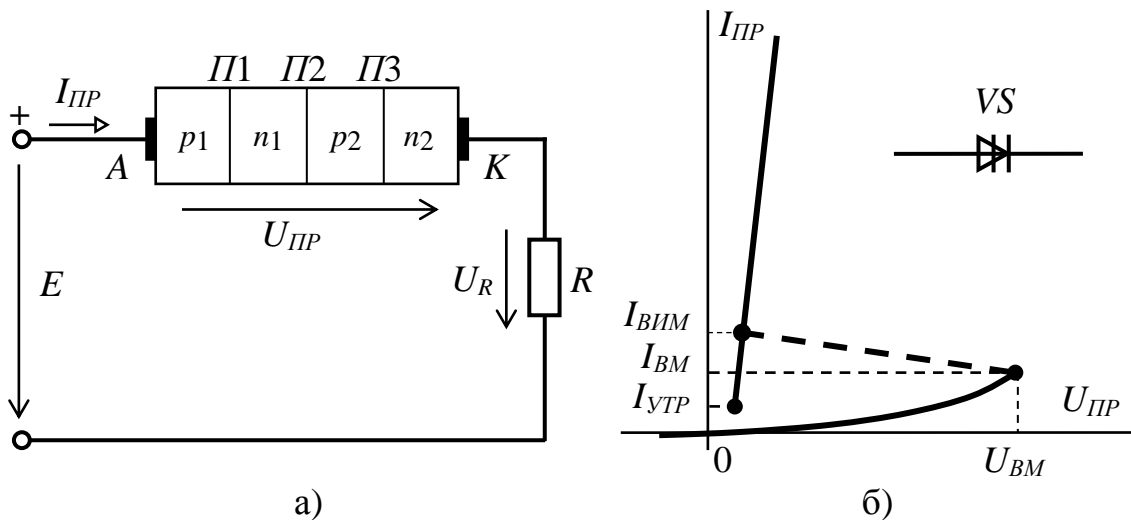
## 4 ТИРИСТОРИ

**Мета роботи:** вивчення будови, принципу дії, вольт-амперних характеристик (ВАХ) тиристорів. Дослідження електричних кіл з тиристорами.

### 4.1 Загальні теоретичні відомості

**Тиристор** – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з трьома або більше  $p-n$  переходами, який має два стійки стани, і ВАХ якого має ділянку з від'ємним диференціальним опором.

**Диністор** – це тиристор, який має два зовнішніх виводи (анод і катод), складається з чотирьох областей з провідностями  $p$ - і  $n$ -типу, які послідовно чергуються (рисунок 4.1).



а – схема увімкнення; б – ВАХ та умовне графічне позначення

Рисунок 4.1 – Диністор

Диністор має три  $p$ - $n$  переходи – два з них П1 і П3 зміщені у прямому напрямку, а середній перехід П2 – у зворотному. Крайню область  $p_1$  називають анодом, а крайню область  $n_2$  – катодом.

Диністор може перебувати у двох станах: закритому (характеризується значним падінням напруги на диністорі та великим опором) і відкритому (характеризується малим падінням напруги на диністорі та протіканням значного струму через нього, а також малим опором).

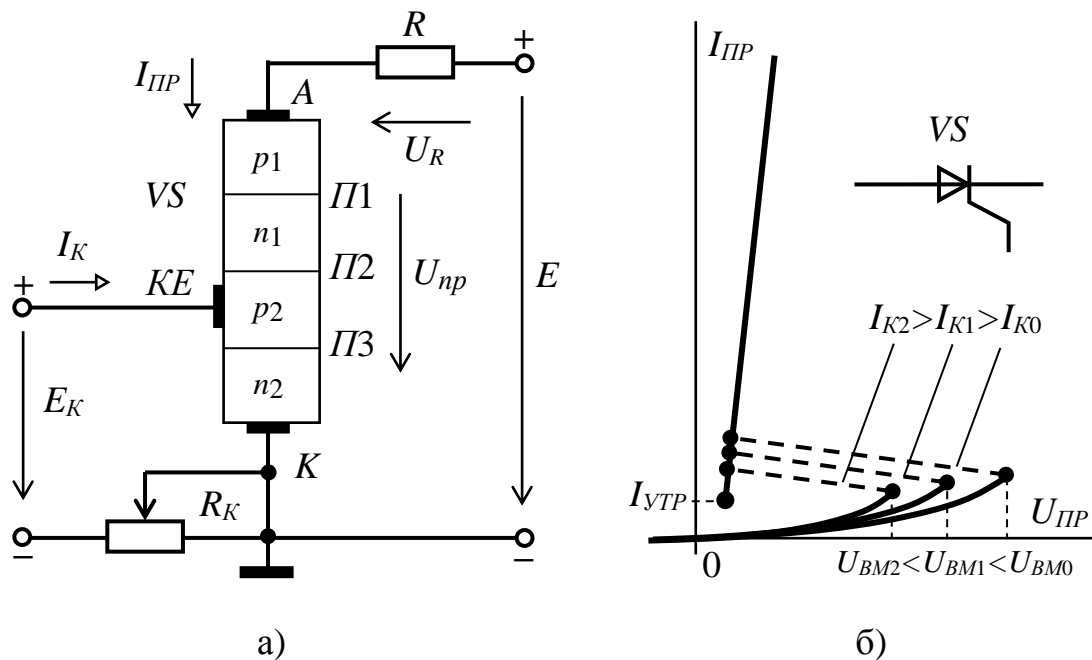
Вимикання диністора відбувається у разі зменшення прямого струму до значення  $I_{PP} < I_{UTP}$ , (де  $I_{UTP}$  – струм утримання – мінімальний прямий струм, при якому диністор ще залишається в увімкненому стані) або при подачі на прилад напруги зворотної полярності.

**Триністор** – це тиристор, який має три зовнішні виводи (анод, катод та керуючий електрод).

Від додаткового зовнішнього джерела  $E_K$  за рахунок струму керування  $I_K$  через керуючий електрод в базу  $p_2$  вводиться додаткова кількість основних носіїв заряду – дірок (рисунок 4.2, а). Це дозволяє вмикати триністор при меншому значенні  $U_{BM}$  ніж диністор (рисунок 4.2, б) або регулювати напругу  $U_{BM}$ . Чим більше струм, що протікає через керуючий електрод  $I_K$ , тим нижче напруга  $U_{BM}$ .

Триністор відкривається за умови  $U_{ПР} \geq U_{ВМ}$  при  $I_K = \text{const}$ ,  $I_{ПР} \geq I_{ВМ}$ , де  $I_{ВМ}$  – струм вимикання – мінімальний прямий струм, що підтримує тиристор в увімкненому стані безпосередньо після його вимикання і зняття струму керування.

Для вимикання триністора необхідно зменшити прямий струм до значення  $I_{ПР} < I_{УТР}$  (де  $I_{УТР}$  – струм утримання – мінімальний прямий струм увімкненого тиристора при розімкненому колі керування) або подати на прилад напругу зворотної полярності.

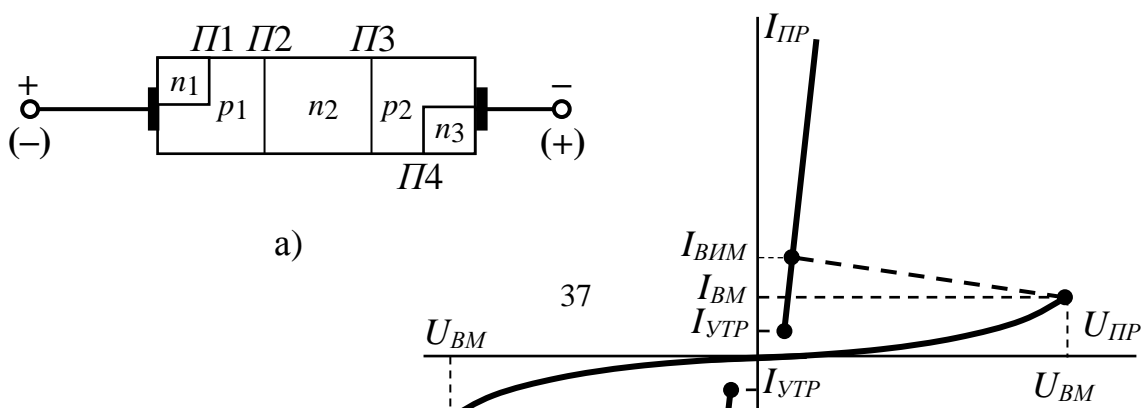


а – структура та схема увімкнення;  
б – ВАХ та умовне графічне позначення

Рисунок 4.2 – Триністор

**Симістор** – це тиристор, який має однакові ВАХ при різних полярностях прикладеної напруги і, який проводить струм в обох напрямках, що дає змогу застосовувати його в колах змінного струму.

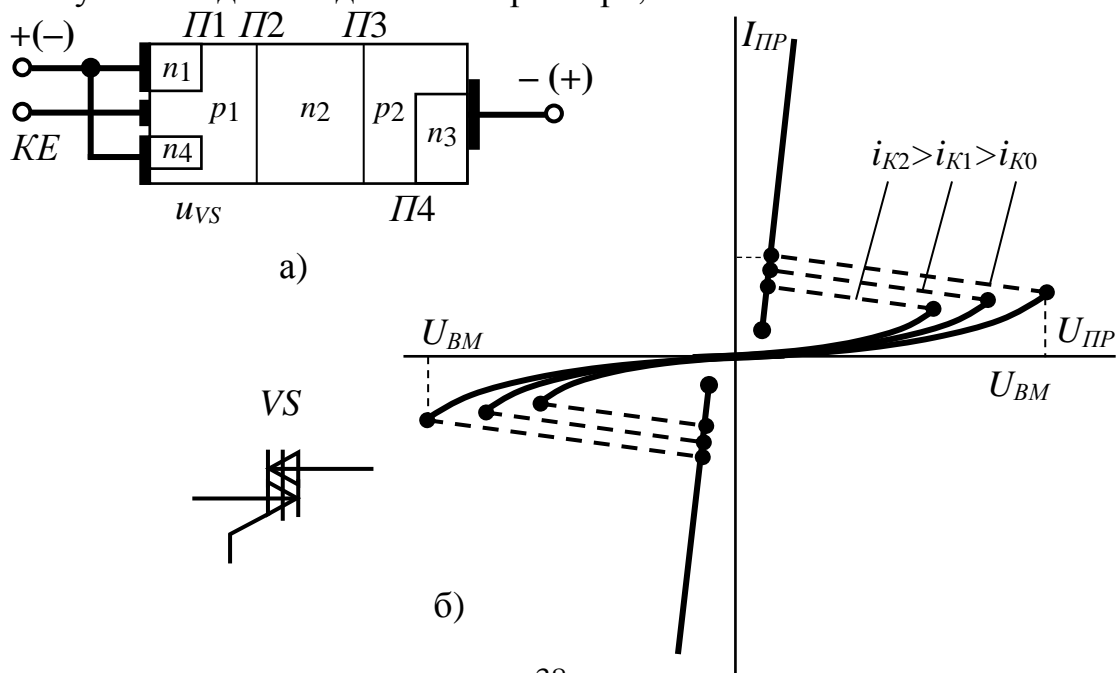
Основою некерованого симістора є монокристалічна структура, що складається з п'яти областей з електропровідностями  $p$ - і  $n$ -типу, які послідовно чергуються і утворюють чотири  $p$ - $n$  переходи (рисунок 4.3, а). Найбільше поширення знайшли керовані симістори, (рисунок 4.4).



а – структура; б – ВАХ та умовне графічне позначення  
Рисунок 4.3 – Некерований симістор

Основні параметри тиристорів:

- напруга вмикання  $U_{BM}$  – пряма напруга, при якій тиристор переходить із закритого у відкритий стан при розімкненому колі керуючого електроду;
- струм вмикання  $I_{BM}$  – таке значення прямого струму через тиристор, вище за яке тиристор переходить у відкритий стан при розімкненому колі керуючого електроду;
- максимально допустимий струм у відкритому стані  $I_{PP,max}$  – максимальне значення струму у відкритому стані, при якому забезпечується задана надійність тиристора;



а – структура; б – ВАХ та умовне графічне позначення

Рисунок 4.4 – Керований симістор

- залишкова напруга  $U_{ПР}$  – значення напруги на тиристорі, що знаходиться у відкритому стані при проходженні через нього максимально допустимого струму;
- струм утримання  $I_{УТР}$  – мінімальний прямий струм увімкненого тиристора при розімкненому колі керування, нижче за який тиристор переходить у непровідний стан;
- час вмикання  $t_{ВМ}$ ;
- час вимикання  $t_{ВИМ}$ .

Наявність ділянки з від’ємним диференційним опором дозволяє використовувати тиристори в підсилювальних і генераторних схемах, а наявність двох стійких станів – застосовувати їх в ключових і перемикаючих електронних пристроях, в керованих випрямлячах.

## 4.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення та умовне графічне позначення тиристорів.
2. Привести конструкцію та описати принцип дії триністора.
3. Привести ВАХ триністора.
4. Скласти найпростішу схему однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча з використанням триністора. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи. Привести графіки зміни в часі (часові діаграми) струму керування  $I_K$ , напруги на тиристорі  $U_{VS}$  і навантаженні  $U_R$  при заданих значеннях напруги мережі  $U_M$  і кута керування тиристором  $\alpha$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані

№ вар.	$U_M$ , В	$\alpha$ , град.	$R_2$ , Ом	$C$ , мкФ	$R_H$ , Ом	№ вар.	$U_M$ , В	$\alpha$ , град.	$R_2$ , Ом	$C$ , мкФ	$R_H$ , Ом
1	20	10	50	6,0	20	16	110	140	350	5,0	55

2	40	30	70	5,5	30	17	130	160	370	6,0	65
3	60	50	90	5,0	40	18	150	15	390	4,5	75
4	80	70	110	4,5	50	19	170	35	410	3,0	85
5	100	90	130	4,0	60	20	190	55	430	1,5	95
6	120	110	150	3,5	70	21	210	75	450	1,0	105
7	140	130	170	3,0	80	22	230	95	470	2,2	115
8	160	150	190	2,5	90	23	25	115	490	3,2	125
9	180	170	210	2,0	100	24	45	135	510	4,2	110
10	200	20	230	1,5	110	25	65	155	60	5,2	95
11	220	40	250	1,0	120	26	85	25	80	6,2	80
12	30	60	270	0,5	130	27	105	45	100	5,8	65
13	50	80	290	2,0	25	28	125	65	120	5,4	50
14	70	100	310	3,0	35	29	145	85	140	5,0	35
15	90	120	330	4,0	45	30	165	105	160	4,6	20

### 4.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для зняття ВАХ триністора (рисунок 4.5).

2. Установити задані параметри елементів схеми.

3. Включити схему. Змінюючи напругу джерела живлення  $E1$  зняти ВАХ тріодного тиристора  $I_{TP} = f(U_{TP})$  при струмах у керуючому електроді  $I_{K1} = 0,93$  мА;  $I_{K2} = 0,97$  мА;  $I_{K3} = 1,0$  мА та визначити напругу вмикання тиристора  $U_{BM}$ . Струм керування  $I_K$  встановлюється за допомогою змінного резистора  $R2$  (при натисканні клавіші <R> опір зменшується, при натисканні комбінацій клавіш <shift>+<R> опір збільшується). Результати вимірів занести в таблицю 4.2.

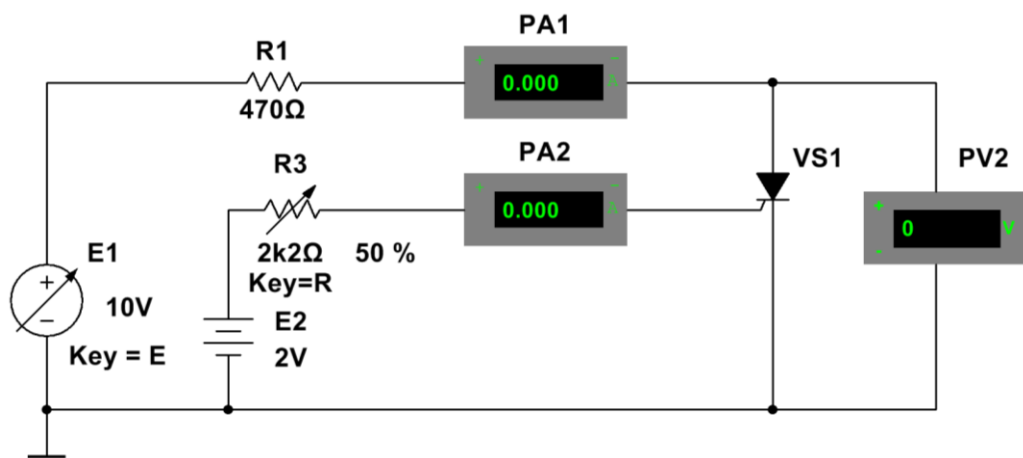




Рисунок 4.5 – Схема для зняття ВАХ триністора

4. За даними таблиці 4.2 побудувати ВАХ тріодного тиристора  $I_{ПР} = f(U_{ПР})$  при значеннях струму у керуючому електроді:  $I_{K.1}$ ;  $I_{K.2}$ ;  $I_{K.3}$ .

Таблиця 4.2 – Результати експериментальних досліджень триністора

$I_{K.1} = 0,93 \text{ мА}, U_{BM.1} = \text{ В}$							
$E1, \text{ В}$							
$U_{np}, \text{ В}$							
$I_{np}, \text{ мА}$							
$I_{K.2} = 0,95 \text{ мА}, U_{BM.2} = \text{ В}$							
$E1, \text{ В}$							
$U_{np}, \text{ В}$							
$I_{np}, \text{ мА}$							
$I_{K.3} = 1,0 \text{ мА}, U_{BM.3} = \text{ В}$							
$E1, \text{ В}$							
$U_{np}, \text{ В}$							
$I_{np}, \text{ мА}$							

5. Набрати схему для дослідження однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча з використанням триністора (рисунок 4.6).

6. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця 4.1).

7. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

8. Включити схему. Змінюючи опір резистора  $R1$  фазообертача (виконаний на елементах  $R1, R2, C1$ ) через рівні проміжки, простежити за зміною величини випрямленої напруги  $U_d$  (вольтметр  $PV1$ ) залежно від величини кута керування тиристором  $\alpha$  (визначається по осцилографу).

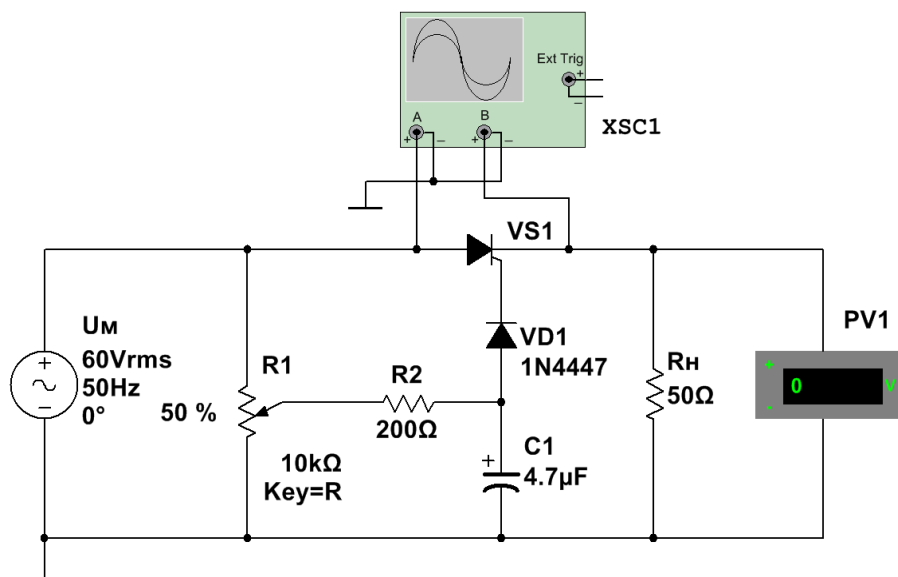


Рисунок 4.6 – Схема для дослідження однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча

9. Привести осцилограми напруги на навантаженні  $U_d$  при різних значеннях кута керування тиристором  $\alpha$  (див. рисунок 4.7).

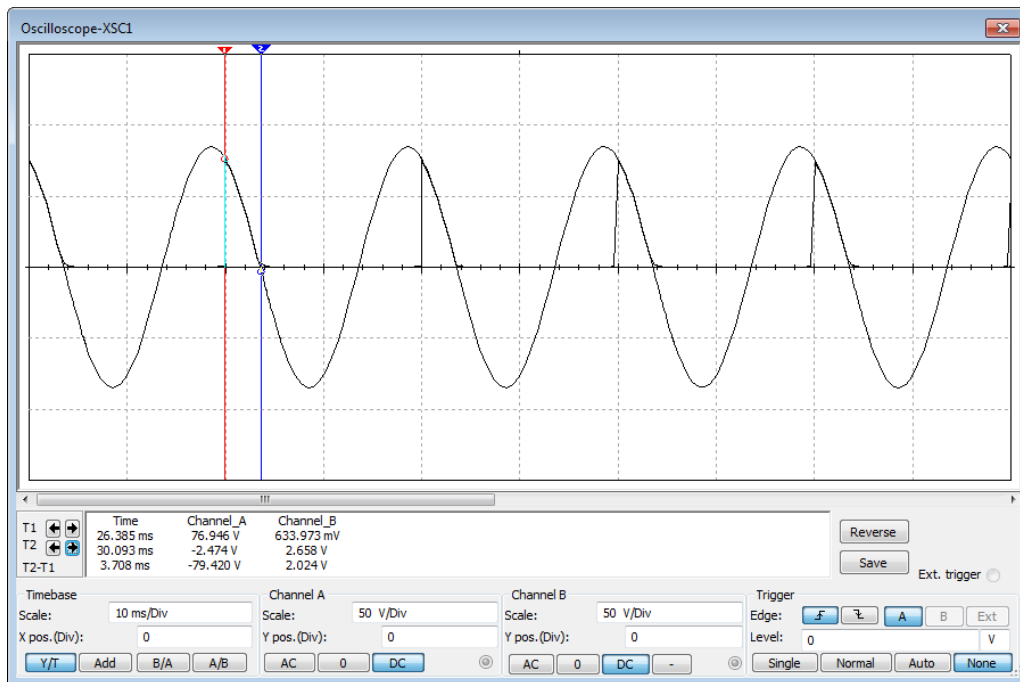


Рисунок 4.7 – Осцилограми напруг керованого випрямляча  
**Контрольні питання**

1. Що називають перемикаючим приладом?
2. Що називають диністором?
3. Що називають триністором?
4. Що називають симістором?
5. Що називають одноперехідним транзистором?
6. Приведіть умовне графічне позначення диністора.
7. Приведіть умовне графічне позначення триністора з керуванням по катоду.
8. Приведіть умовне графічне позначення керованого симістора.
9. Приведіть умовне графічне позначення некерованого симістора.

10. Приведіть умовне графічне позначення одноперехідного транзистора.
11. Приведіть ВАХ диністора.
12. Приведіть ВАХ триністора.
13. Приведіть ВАХ некерованого симістора.
14. Приведіть ВАХ одноперехідного транзистора.
15. Приведіть напівпровідникову структуру диністора.
16. Приведіть напівпровідникову структуру триністора.
17. Приведіть напівпровідникову структуру симістора.
18. Поясніть призначення однофазного керованого випрямляча.
19. Поясніть, на якому принципі базується робота однофазного керованого випрямляча?
20. Опишіть принцип дії однофазного керованого випрямляча (рисунк 4.6).
21. Поясніть призначення елементів однофазного керованого випрямляча (рисунк 4.6).
22. Що таке кут керування тиристора  $\alpha$ ?
23. Як буде змінюватися середнє значення напруги за півперіоду, якщо кут керування тиристора буде змінюватися від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ ?
24. В яких межах можна регулювати напругу на навантаженні  $U_{HL}$  (рисунк 4.8), змінюючи кут керування тиристором від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , якщо  $U_M = 220$  В?
25. В яких межах можна регулювати напругу на навантаженні  $U_{HL}$  (рисунк 4.9), змінюючи кут керування тиристором  $\alpha$  від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , якщо  $U_M = 220$  В?

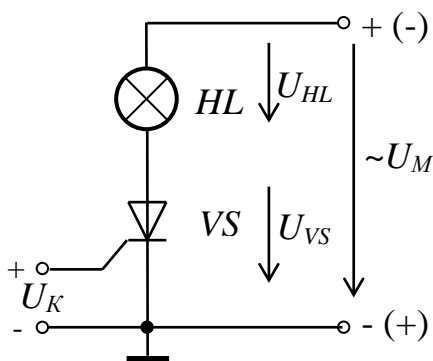


Рисунок 4.8

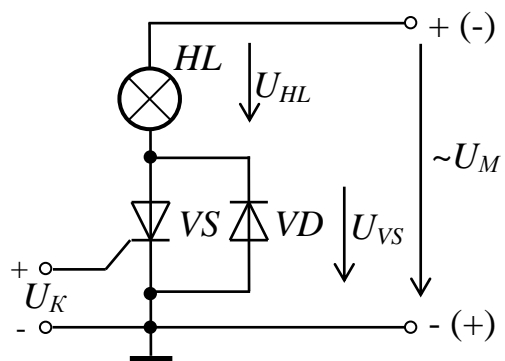


Рисунок 4.9

## 5 ПІДСИЛЮВАЧІ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і методів розрахунку підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах. Дослідження підсилювачів на біполярних транзисторах, увімкнених за схемою із спільним емітером.

### 5.1 Загальні теоретичні відомості

**Підсилювачем** називають пристрій, який призначений для збільшення параметрів електричного сигналу (напруги, струму, потужності).

Основні параметри підсилювачів:

- коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = \frac{U_{BHX}}{U_{BX}};$$

- коефіцієнт підсилення за струмом

$$K_I = \frac{I_{BHX}}{I_{BX}};$$

- коефіцієнт підсилення за потужністю

$$K_P = \frac{P_{BHX}}{P_{BX}} = K_U \cdot K_I;$$

- робочий діапазон частот  $\Delta f_P$ ;
- вхідний опір  $R_{BX}$  – опір між вхідними затискачами підсилювача для змінного вхідного струму;
- вихідний опір  $R_{BHX}$  – опір між вихідними затискачами підсилювача для змінного струму при відключеному опорі навантаження;
- коефіцієнт корисної дії підсилювача  $\eta$  – відношення потужності, що віддається підсилювачем в навантаження, до потужності, що споживається від джерела живлення;
- динамічний діапазон  $D$  – відношення максимальної вхідної напруги до мінімальної вхідної напруги, при яких нелінійні викривлення не перевищують встановлених норм;
- коефіцієнт нелінійних викривлень.

Основною характеристикою підсилювача є його амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – залежність коефіцієнту підсилення за напругою від частоти  $k_U = f(f)$ .

Всі підсилювачі можна підрозділити на два класи – з лінійним і нелінійним режимом роботи.

У підсилювачах з лінійним режимом роботи вихідний сигнал повинен бути близьким за формою до вхідного. Викривлення форми сигналу, що вносяться підсилювачем, повинні бути мінімальними. Залежно від виду АЧХ підсилювачі з лінійним режимом роботи підрозділяють на:

- підсилювачі сигналу, що змінюється повільно (підсилювачі постійного струму (ППС));
- підсилювачі звукових частот (ПЗЧ);
- підсилювачі високої частоти (ПВЧ);
- широкосмугові підсилювачі (ШСП);
- вузькосмугові підсилювачі (ВСП).

У підсилювачах з нелінійним режимом роботи відсутня пропорційність між вихідним і вхідним сигналом. Такі підсилювачі застосовуються для перетворення вхідного сигналу, наприклад, синусоїдального – в імпульсний, а також для підсилення імпульсів.

На рисунку 5.1 наведена схема підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненому за схемою із спільним емітером. Основними елементами схеми є джерело живлення  $E_K$ , керуючий елемент – транзистор  $VT$  і резистор  $R_K$ . Ці елементи утворюють головне коло підсилювального каскаду, в якому за рахунок протікання керованого колекторного струму створюється підсилена змінна напруга на виході схеми. Решта елементів виконує допоміжну роль. Конденсатори  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$  є роздільними, їх функція зводиться до пропускання змінної і затримання постійної складової напруги.

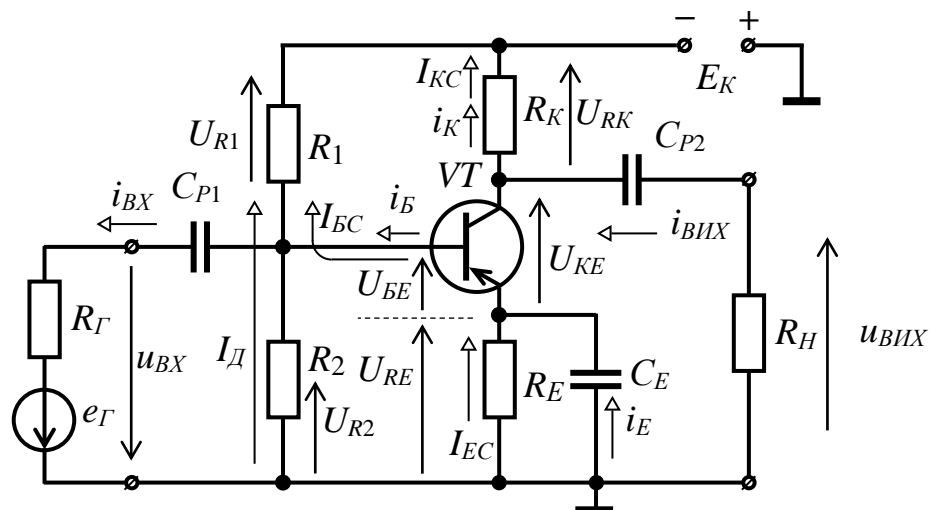


Рисунок 5.1 – Схема підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненому за схемою із спільним емітером

Резистори  $R_1$ ,  $R_2$  забезпечують режим спокою каскаду. Оскільки біполярний транзистор керується струмом, то струм спокою, в даному випадку струм  $I_{KC}$ , створюється відповідним струмом бази спокою  $I_{BC}$ . Резистор  $R_1$  призначений для створення кола протікання струму  $I_{BC}$ , а також спільно з резистором  $R_2$  забезпечує початкову напругу на базі  $U_{BC}$  відносно затискача «+» джерела живлення  $E_K$ .

З метою зменшення впливу температури на початкове положення робочої точки в коло емітера транзистора введений резистор  $R_E$ , на якому створюється напруга від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) за постійним струмом  $U_{RE}$ . Для усунення ВЗЗ за змінним струмом цей резистор шунтують конденсатором  $C_E$ .

Принцип дії каскаду з полягає в наступному. При підключенні до входу підсилювача джерела змінної напруги  $e_T$  на базі транзистора з'являється змінна напруга  $u_{BX}$ , яка змінює початкову напругу  $U_{BEC}$ . Під впливом напруги  $u_{BX}$  в колі бази з'являється змінна складова струму  $i_{B\sim}$ , яка викликає появу змінної складової струму в колі колектора  $i_{K\sim} = \beta i_{B\sim}$ . За рахунок падіння напруги на резисторі  $R_K$  створюється змінна складова напруги на колекторі, яка через конденсатор  $C_{P2}$  передається на вихід каскаду – в коло навантаження  $R_H$ . Для змінного струму резистори  $R_K$  і  $R_H$  увімкнені паралельно.

Аналіз каскаду за постійним струмом проводять графоаналітичним методом. Графічні побудови проводяться за допомогою вихідних (колекторних) характеристик транзистора (рисунок 5.2). На вихідних характеристиках проводять лінію навантаження каскаду за постійним струмом ( $T_1T_2$ ). Аналітично залежність  $U_{KEC} = f(I_{KC})$  знаходять з рівняння, що характеризує баланс напруги у вихідному колі каскаду:

$$E_K = U_{KEC} + I_{KC}R_K + I_{EC}R_E \approx U_{KEC} + I_{KC}(R_K + R_E), \quad (5.1)$$

звідки

$$U_{KEC} = E_K - I_{KC}(R_K + R_E). \quad (5.2)$$

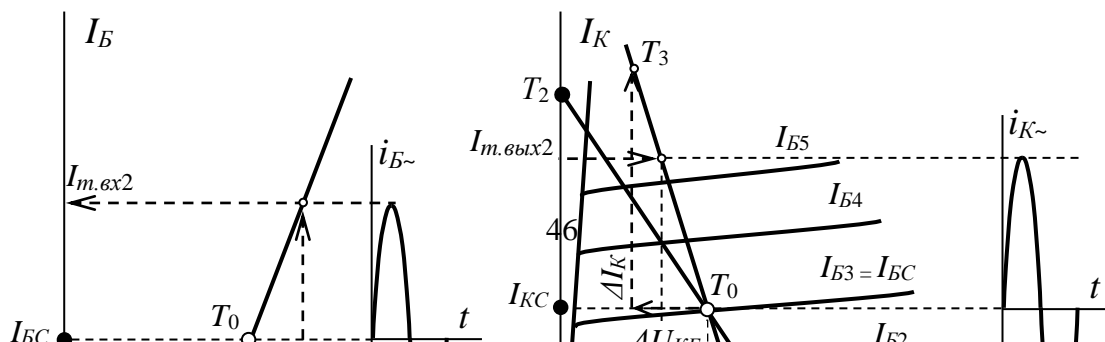


Рисунок 5.2 – Розрахунок підсилювального каскаду на біполярному транзисторі графоаналітичним методом

Побудову лінії навантаження каскаду за постійним струмом проводять по двох точках, що характеризують режим холостого ходу (точка  $T_1$ ) і короткого замикання (точка  $T_2$ ) вихідного кола каскаду:

- для точки  $T_1$   $I_{KC} = 0$ ,  $U_{KEC} = E_K$ ;
- для точки  $T_2$   $U_{KEC} = 0$ ,  $I_{KC} = E_K / (R_K + R_E)$ .

Вибравши по вхідній характеристиці  $I_B = f(U_{BE})$  необхідне значення струму бази спокою  $I_{BC}$ , визначаємо координати точки  $T_0$  перетину відповідної вихідної характеристики при  $I_B = I_{BC}$  з лінією навантаження каскаду за постійним струмом.

Початкове положення робочої точки забезпечується дільником напруги  $R_1 R_2$ , опори резисторів якого:

$$R_1 = \frac{E_K - U_{BEC} - U_{EC}}{I_D + I_{BC}} = \frac{E_K - U_{BC}}{I_D + I_{BC}}; \quad (5.3)$$

$$R_2 = \frac{U_{BEC} + U_{EC}}{I_D} = \frac{U_{BC}}{I_D}, \quad (5.4)$$

де  $I_D = (2...5)I_{BC}$  – струм в колі дільника;

$$U_{EC} = (0,1 \dots 0,25)E_K.$$

При визначенні змінних складових вихідної напруги каскаду і колекторного струму транзистора використовують лінію навантаження каскаду за змінним струмом. Опір каскаду за змінним струмом визначається опорами резисторів  $R_K$  і  $R_H$ , які увімкнені паралельно, тобто

$$R_{H\approx} = R_K \parallel R_H = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}. \quad (5.5)$$

Опір навантаження каскаду за постійним струмом більший,  $R_{H-} = R_K + R_E$  ніж за змінним струмом  $R_{H\approx} = R_K \parallel R_H$ .

Оскільки за наявності вхідного сигналу напруга і струм транзистора являють собою суми постійних і змінних складових, лінія навантаження за змінним струмом проходить через точку спокою  $T_0$  (рис. 5.2). Нахил лінії навантаження за змінним струмом ( $T_0T_3$ ) буде більший, ніж за постійним струмом. Лінію навантаження за змінним струмом будують за відношенням прирощень напруг до струму:

$$\Delta I_K = \frac{\Delta U_{KE}}{R_{H\approx}}. \quad (5.6)$$

Задану величину  $\Delta U_{KE}$  відкладають ліворуч від точки спокою  $T_0$ , визначене значення  $\Delta I_K$  відкладають вгору від струму  $I_{KC}$  (точка  $T_3$ ). З'єднавши точки  $T_3$  і  $T_0$  отримують лінію навантаження за змінним струмом.

Під час подачі на вхід каскаду напруги  $u_{BX}$  в базовому колі транзистора створюється змінна складова струму  $i_{B\sim}$ , яка пов'язана з напругою  $u_{BX}$  вхідною характеристикою транзистора. Оскільки струм колектора через коефіцієнт  $\beta$  пропорційно залежить від струму бази, в колекторному колі транзистора створюється змінна складова струму  $i_{K\sim}$  і змінна вихідна напруга  $u_{BIX}$ , яка пов'язана із струмом  $i_{K\sim}$  лінією навантаження за змінним струмом. Робоча точка переміщується вниз від точки спокою  $T_0$  при позитивній півхвилі вхідної напруги і вгору – при негативній півхвилі.

## 5.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення, класифікацію та основні параметри підсилювачів на біполярних транзисторах.



2. Привести схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером (режим підсилення класу А). Описати призначення елементів схеми.

3. Виконати розрахунок підсилювального каскаду графоаналітичним методом:

- побудувати вхідну  $I_B = f(U_{BE})$  і вихідну  $I_K = f(U_{KE})$  ВАХ біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером;
- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за постійним струмом;
- визначити параметри режиму спокою:  $U_{KEC}$ ,  $I_{KC}$ ,  $U_{BEC}$ ,  $I_{BC}$ ;
- визначити величину опору резистора  $R_B$ , що забезпечує режим спокою каскаду;
- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за змінним струмом;
- побудувати графіки зміни струмів бази  $I_B$  і колектора  $I_K$ , напруг колектор-емітер  $U_{KE}$  і база-емітер  $U_{BE}$  при синусоїдальній вхідній напрузі (величина амплітуди вхідної напруги не повинна виходити за межі лінійної частини вхідної ВАХ транзистора).

**Вихідні дані:** координати точок лінійної частини вхідної ВАХ біполярного транзистора  $I_B = f(U_{BE})$ ; значення коефіцієнта підсилення транзистора  $\beta$ , напруги джерела живлення  $E_K$ , опору резистора в колі колектора  $R_K$  наведені в таблиці 2.1 до лабораторної роботи № 2. Опір навантаження  $R_H$  приймається рівним опору резистора  $R_K$ .

4. Визначити коефіцієнти підсилення каскаду за напругою  $K_U$ , струмом  $K_I$  і потужністю  $K_P$ .

### 5.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (рисунок 5.3).

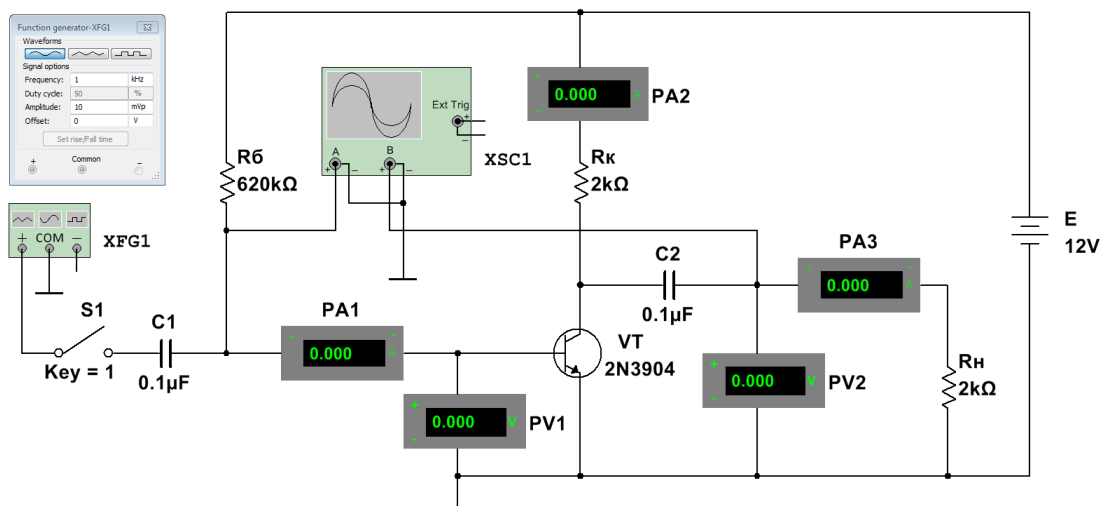


Рисунок 5.3 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі

2. Установити задані параметри елементів схеми і віртуального генератора.

3. Лінію, що з'єднує вхід “В” віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Перемикачем  $S1$  відключити генератор від входу підсилювача. Резистором  $R_B$  установити параметри режиму спокою, значення яких визначені в п. 5.2.3. Записати показання приладів.

5. Перемикачем  $S1$  підключити генератор до входу підсилювача. Записати показання приладів. За допомогою візирних ліній осцилографа визначити амплітуди напруг на вході  $U_{m.BX}$  та виході  $U_{m.BIX}$  підсилювального каскаду. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 5.4).

6. За експериментальними даними визначити коефіцієнти підсилення каскаду за напругою  $K_U$ , струмом  $K_I$  і потужністю  $K_P$ .

7. Збільшити вхідну напругу до  $U_{BX} = 0,1$  В. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 5.5). Пояснити причину викривлення вихідної напруги підсилювального каскаду.

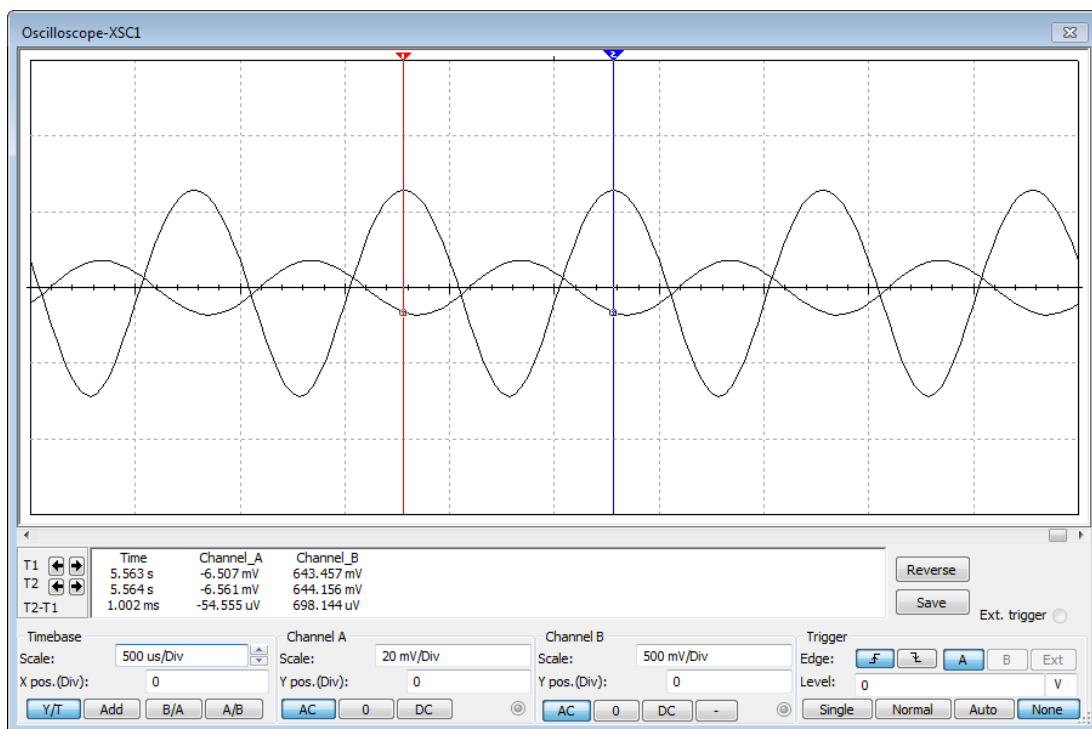


Рисунок 5.4 – Осцилограми напруг підсилювального каскаду на біполярному транзисторі при  $U_{BX} = 10$  мВ

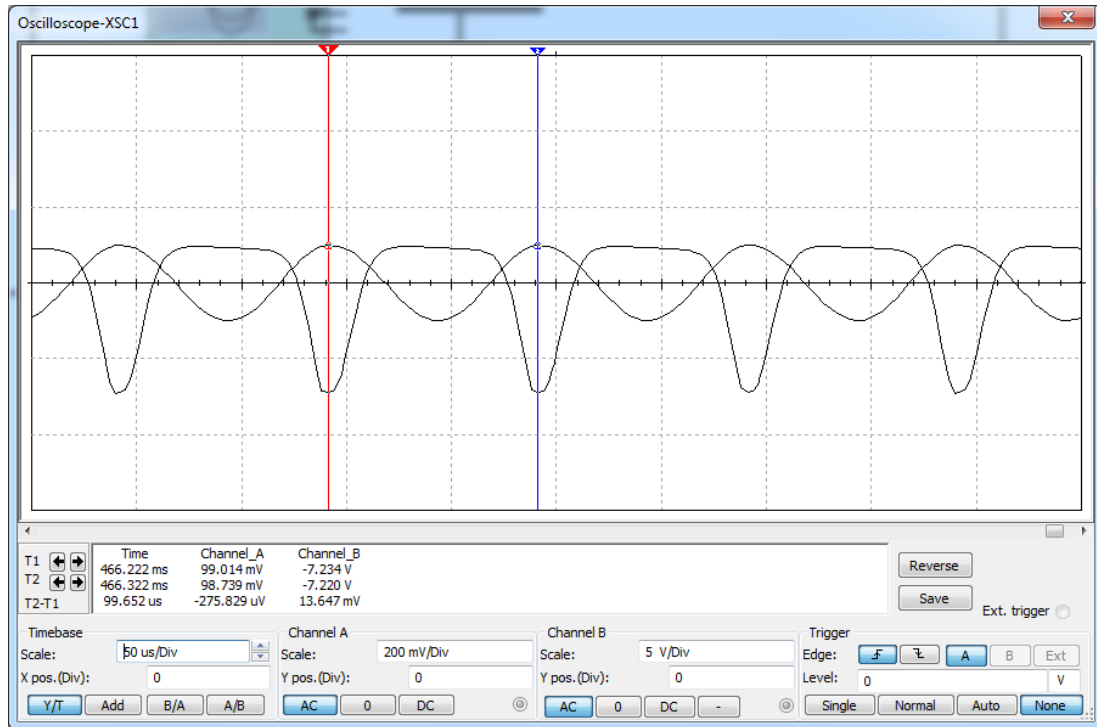


Рисунок 5.5 – Осцилограми напруг підсилювального каскаду на біполярному транзисторі при  $U_{BX} = 100$  мВ

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення підсилювачів.
2. Наведіть класифікацію підсилювачів.
3. Назвіть основні параметри підсилювачів.
4. Назвіть режими роботи підсилювальних каскадів та поясніть чим вони забезпечуються.
5. Наведіть визначення режиму спокою підсилювального каскаду.
6. Наведіть схеми задання режиму спокою підсилювального каскаду і поясніть принцип їх дії.
7. Поясніть, чому виникає потреба в температурній стабілізації підсилювального каскаду і як вона забезпечується?
8. Поясніть при якому способі увімкнення біполярного транзистора можна забезпечити найбільше підсилення потужності в підсилювальному каскаді?

9. Наведіть схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювача.
10. Поясніть методику побудови лінії навантаження каскаду за постійним струмом та визначення параметрів режиму спокою.
11. Поясніть методику побудови лінії навантаження каскаду за змінним струмом та визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою  $K_U$ , струмом  $K_I$  і потужністю  $K_P$ .
12. Поясніть, як зміниться положення робочої точки і параметри режиму спокою підсилювального каскаду при зміні: величини опору резистора  $R_K$ ; напруги живлення  $E_K$ ; коефіцієнта підсилення  $\beta$ ; струму бази  $I_B$ ?

## 6 ПІДСИЛЮВАЧІ НА ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і методів розрахунку підсилювальних каскадів на польових транзисторах. Дослідження підсилювачів на польових транзисторах, увімкнених за схемою із спільним витоком.

### 6.1 Загальні теоретичні відомості

Основними елементами підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керуючим  $p$ - $n$  переходом (рисунк 6.1) є джерело живлення  $E_C$ , транзистор  $VT$  і резистор  $R_C$ .

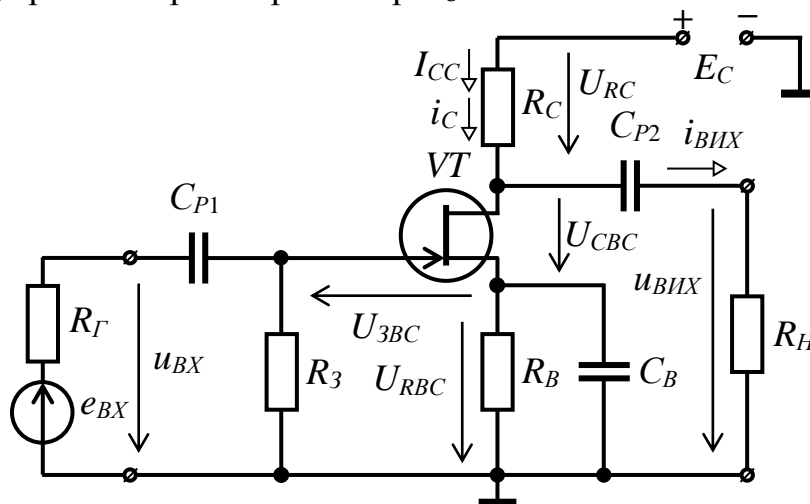


Рисунок 6.1 – Схема підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керуючим  $p$ - $n$  переходом із спільним витоком

Навантаження підключене через роздільний конденсатор  $C_{P2}$  до стоку транзистора. Решта елементів каскаду виконує допоміжну роль. Резистори  $R_3$ ,  $R_B$  призначені для задання напруги  $U_{3BC}$  в режимі спокою. Резистор  $R_B$  виконує функцію формування напруги автоматичного зміщення, що подається на затвор, а також створює в каскаді від'ємний зворотний зв'язок (ВЗЗ) за постійним струмом, який призначений для стабілізації режиму спокою при зміні температури. Конденсатор  $C_B$  призначений для виключення ВЗЗ за змінним струмом. Роздільний конденсатор  $C_{P1}$  забезпечує зв'язок каскаду з джерелом вхідного сигналу.

Аналіз роботи підсилювального каскаду на польовому транзисторі проводимо використовуючи графоаналітичний метод. Рівняння електричної рівноваги для кола стік-витік в режимі спокою має вигляд:

$$E_C = U_{CBC} + I_{CC}(R_C + R_B), \quad (6.1)$$

звідки

$$U_{CBC} = E_C - I_{CC}(R_C + R_B). \quad (6.2)$$

Струм стоку спокою  $I_{CC}$  і напруга стік-витік спокою  $U_{CBC}$  визначаються напругою затвор-витік транзистора  $U_{3BC}$ , що відповідає точці спокою. Точка спокою  $T_0$  розміщується на лінії навантаження за постійним струмом, яка проходить через точки  $T_1$  і  $T_2$  (рисунк 6.2):

- для точки  $T_1$ :  $I_C = 0$ ,  $U_{CB} = E_C$ ;
- для точки  $T_2$ :  $U_{CB} = 0$ ;  $I_C = E_C / (R_C + R_B)$ .

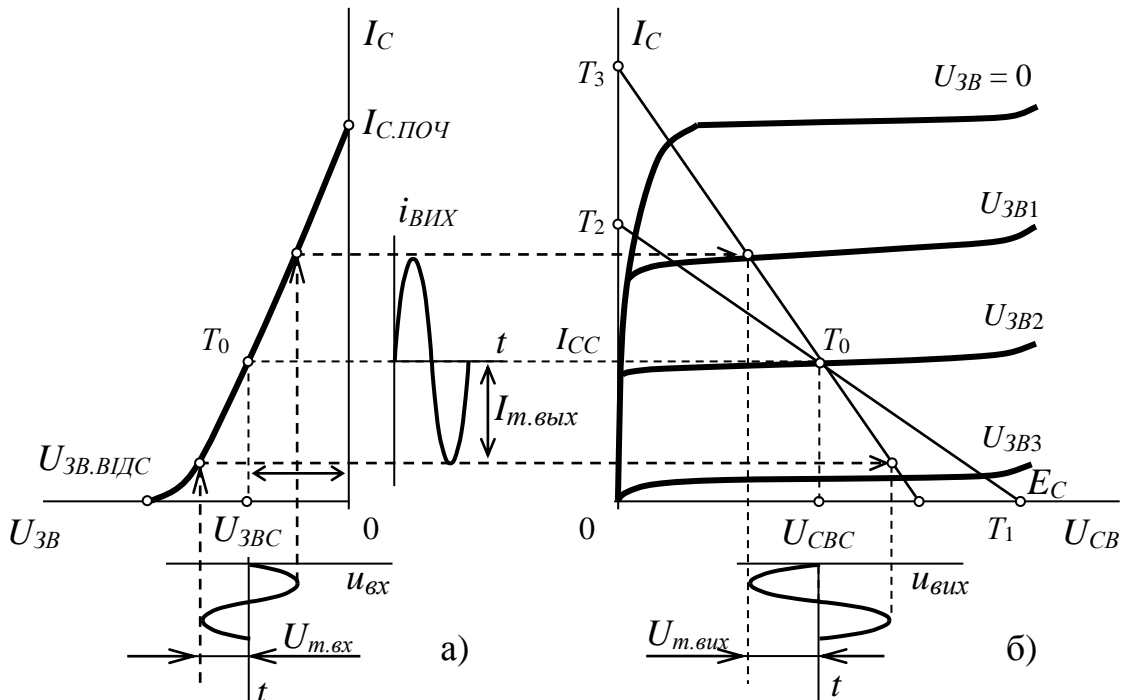


Рисунок 6.2 – Графоаналітичний розрахунок підсилювального каскаду на польовому транзисторі

Лінія навантаження за змінним струмом (пряма  $T_0T_3$ ) визначається опором:

$$R_{H\sim} = R_C \parallel R_H = \frac{R_C \cdot R_B}{R_C + R_B}. \quad (6.3)$$

Елементами, які призначені для створення напруги  $U_{звс}$  в режимі спокою, є резистори  $R_B$  і  $R_3$ . Необхідні величини і полярність напруги отримують на резисторі  $R_B$  в результаті протікання через нього струму  $I_{BC} = I_{CC}$ . У зв'язку з цим вибір резистора  $R_B$  проводять за співвідношенням:

$$R_B = \frac{U_{звс}}{I_{CC}}. \quad (6.4)$$

Резистор  $R_3$  призначений для забезпечення потенціалу затвора рівним потенціалу нижнього виводу резистора  $R_B$ , тобто для подачі напруги  $U_{звс}$  з резистора  $R_B$  між затвором і витокom транзистора. Значення  $R_3$  приймають 1...2 МОм.

Під час подачі на вхід підсилювального каскаду змінної напруги  $u_{BX}$  з'явиться змінна складова струму стоку  $i_C$  (рисунок 6.2). Зміна цьо-

го струму призводить до зміни напруги  $U_{CB}$  між стоком та витоком. Його змінна складова  $u_C$ , яка дорівнює за величиною та протилежна за фазою падінню напруги на резисторі  $R_C$ , є вихідною напругою підсилювального каскаду.

## 6.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення, класифікацію та основні параметри підсилювачів на польових транзисторах.

2. Привести схему підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим  $p$ - $n$  переходом, увімкненого за схемою із спільним витоком. Описати призначення елементів схеми.

3. Виконати розрахунок підсилювального каскаду, що працює в режимі підсилення класу А, на польовому транзисторі з керованим  $p$ - $n$  переходом графоаналітичним методом:

- побудувати стік-затворну  $I_C = f(U_{3B})$  і стокові  $I_C = f(U_{CB})$  ВАХ польового транзистора з керованим  $p$ - $n$  переходом;
- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за постійним струмом;
- визначити параметри режиму спокою:  $U_{3BC}$ ,  $I_{CC}$ ,  $U_{CBC}$ ;
- визначити величину опору резистора  $R_B$ , що забезпечує режим спокою каскаду;
- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за змінним струмом;
- побудувати графіки зміни струму стоку  $I_C$ , напруг затвор-витік  $U_{3B}$  і стік-витік  $U_{CB}$  при синусоїдальній вхідній напрузі.

**Вихідні дані:** варіанти завдань наведені в таблиці 6.1.

## 6.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим  $p$ - $n$  переходом (рисунок 6.3).

2. Установити задані параметри елементів схеми і віртуального генератора.

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

№ вар.	S, мА/В	I <sub>С</sub> поч., мА	U <sub>ЗВ</sub> вiдс., В	E <sub>С</sub> , В	R <sub>С</sub> , кОм	№ вар.	S, мА/В	I <sub>С</sub> поч., мА	U <sub>ЗВ</sub> вiдс., В	E <sub>С</sub> , В	R <sub>С</sub> , кОм
1	0,5	1,0	0,2	8	7	16	2,0	4,2	0,3	23	10
2	0,6	1,4	0,3	9	8	17	2,1	4,4	0,4	24	7
3	0,7	1,6	0,4	10	9	18	2,2	4,6	0,5	25	8
4	0,8	1,8	0,5	11	10	19	2,3	4,8	0,6	8	9
5	0,9	2,0	0,6	12	7	20	2,4	5,0	0,7	9	10
6	1,0	2,2	0,7	13	8	21	2,5	5,4	0,8	10	7
7	1,1	2,4	0,8	14	9	22	2,6	5,6	0,9	11	8
8	1,2	2,6	0,9	15	10	23	2,7	5,8	1,0	12	9
9	1,3	2,8	1,0	16	7	24	2,8	6,0	1,1	13	10
10	1,4	3,0	1,1	17	8	25	2,9	6,4	1,2	14	7
11	1,5	3,2	1,2	18	9	26	3,0	6,8	1,3	15	8
12	1,6	3,4	1,3	19	10	27	3,1	7,0	1,4	16	9
13	1,7	3,6	1,4	20	7	28	3,2	7,2	1,5	17	10
14	1,8	3,8	1,5	21	8	29	3,3	7,4	1,2	18	7
15	1,9	4,0	0,2	22	9	30	3,4	7,6	1,0	19	8

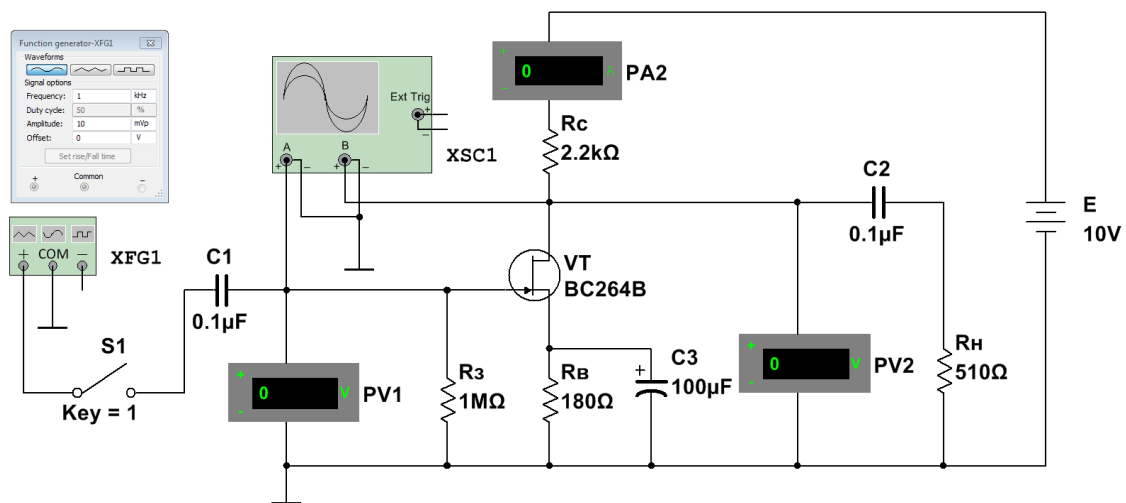


Рисунок 6.3 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим *p-n* переходом

4. Включити схему. Перемикачем *S1* відключити генератор від входу підсилювача. Резистором  $R_B$  установити параметри режиму спокою, значення яких визначені в п. 6.2.3. Записати показання приладів.



5. Перемикачем  $S1$  підключити генератор до входу підсилювача. Записати показання приладів. За допомогою візирних ліній осцилографа визначити амплітуди напруг на вході і виході підсилювального каскаду. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 6.4).

6. За експериментальними даними визначити коефіцієнт підсилення каскаду за напругою  $K_U$ .

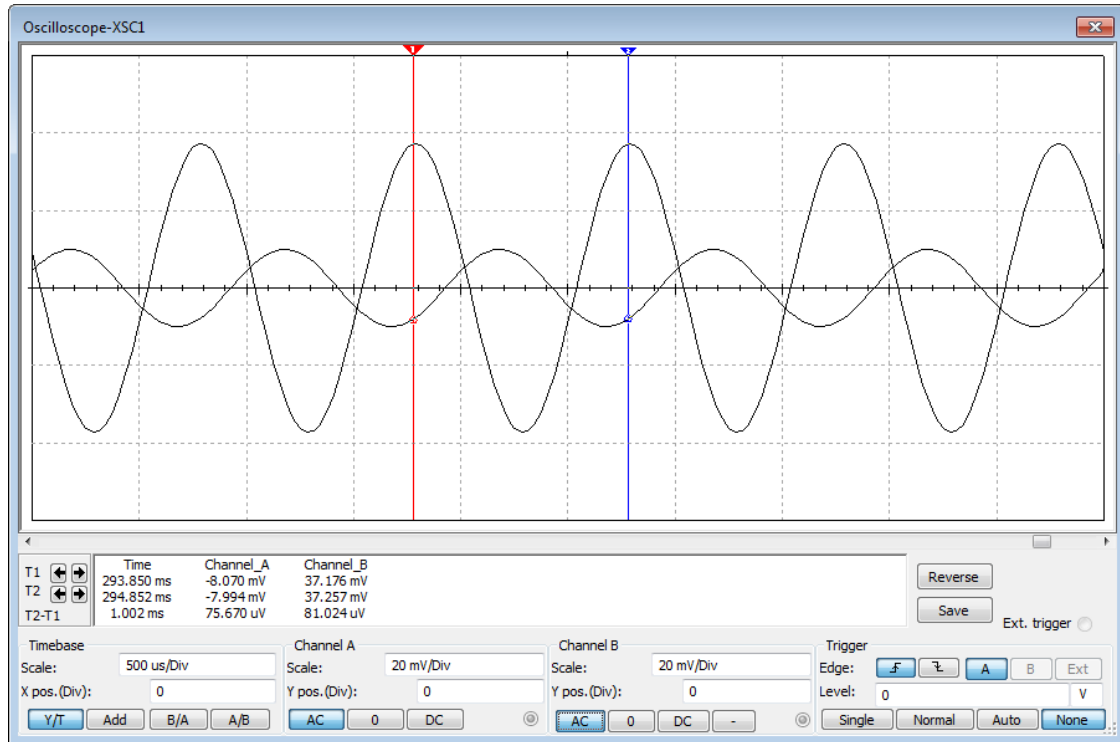


Рисунок 6.4 – Осцилограми напруг підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим  $p-n$  переходом

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення підсилювачів.
2. Назвіть основні параметри підсилювачів.
3. Наведіть визначення режиму спокою підсилювального каскаду.
4. Наведіть схеми задання режиму спокою підсилювальних каскадів на польових транзисторах і поясніть принцип їх дії.
5. Наведіть схему підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим  $p-n$  переходом, увімкненого за схемою із спі-

- льним витоком. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
6. Наведіть схему підсилювального каскаду на польовому МДН-транзисторі з вбудованим каналом, увімкненого за схемою із спільним витоком. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
  7. Наведіть схему підсилювального каскаду на польовому МДН-транзисторі з індукованим каналом, увімкненого за схемою із спільним витоком. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
  8. Поясніть методику побудови лінії навантаження підсилювача на польовому транзисторі за постійним струмом та визначення параметрів режиму спокою.
  9. Поясніть методику побудови лінії навантаження підсилювального каскаду на польовому транзисторі за змінним струмом та визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою  $K_U$  і потужністю  $K_P$ .
  10. Поясніть, як зміниться положення робочої точки і параметри режиму спокою підсилювального каскаду на польовому транзисторі при зміні: величини опору резистора  $R_C$ ; напруги живлення  $E_C$ ; напруги  $U_{ЗВ}$ ; крутизни ВАХ транзистора  $S$ ?

## 7 ОПЕРАЦІЙНІ ПІДСИЛЮВАЧІ

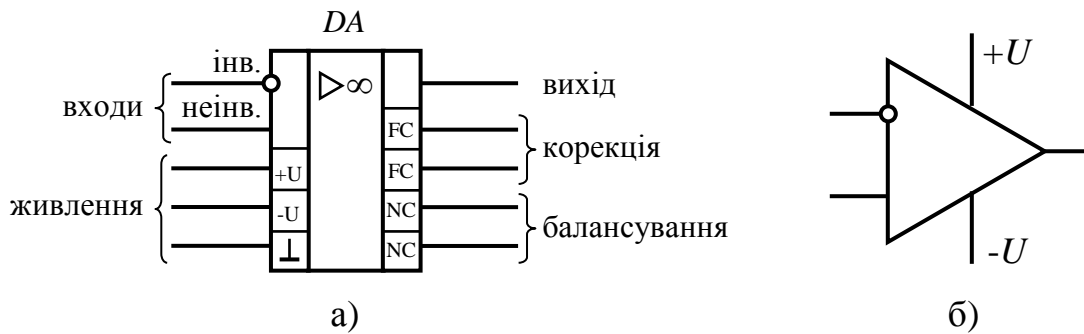
**Мета роботи:** вивчення принципу дії та дослідження пристроїв на операційних підсилювачах (ОП).

### 7.1 Загальні теоретичні відомості

**Операційний підсилювач** – це підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, який охоплений колом ВЗЗ, що визначає основні якісні показники і характер операцій, які виконує підсилювач. Умовне позначення ОП наводиться на рисунку 7.1.

Один з входів підсилювача називається інвертуючим, а другий – неінвертуючим. При подачі сигналу на неінвертуючий вхід припорощення вихідного сигналу співпадає за знаком (фазою) з припорощенням вхідного сигналу. Якщо ж сигнал поданий на інвертуючий вхід, то припорощення вихідного сигналу має зворотний знак (протилежний за

фазою) в порівнянні з прирощенням вхідного сигналу. Інвертуючий вхід часто використовують для введення в ОП зовнішніх ВЗЗ.



а – умовне графічне позначення ГОСТ; б – умовне графічне позначення ANSI;

Рисунок 7.1 – Умовне позначення операційного підсилювача

Сучасний операційний підсилювач виконується у вигляді інтегральної мікросхеми, до виводів якої, окрім кола ВЗЗ, приєднуються джерела живлення, джерела вхідних сигналів, опір навантаження, кола корекції частотних характеристик ОП та інші кола.

Операційні підсилювачі застосовуються в підсилювальній техніці, пристроях генерації сигналів синусоїдальної і імпульсної форми, в стабілізаторах напруги, активних фільтрах і т. д.

Основні параметри ОП:

- коефіцієнт підсилення напруги  $K_{U\text{ ОП}} = \frac{\Delta U_{\text{ВІХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$ ;
- вхідна напруга зміщення нуля – значення напруги на вході ОП, при якому  $U_{\text{ВІХ}} = 0$ ;
- вхідний опір  $R_{\text{ВХ}}$ ;
- вихідний опір  $R_{\text{ВІХ}}$ ;
- напруга живлення  $U_{\text{Ж}} = \pm 3 \dots \pm 15 \text{В}$ ;
- максимальна вихідна напруга  $U_{\text{ВІХ max}} = 0,9 U_{\text{Ж}}$ ;
- максимальний вихідний струм  $I_{\text{ВІХ max}}$ .

Залежність вихідної напруги ОП  $U_{\text{ВІХ}}$  від напруги, що подається до його входів  $U_{\text{ВХ}}$  представлена у виді амплітудної характеристики (рисунок 7.2).

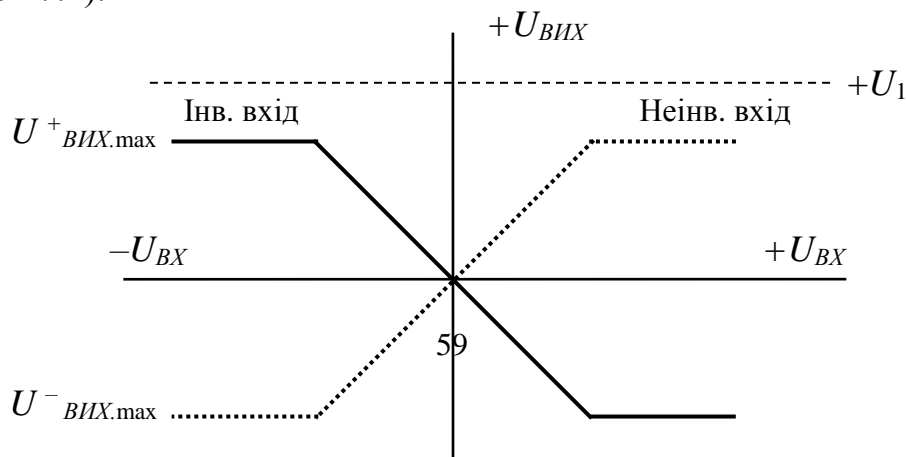


Рисунок 7.2 – Амплітудна характеристика  $U_{BHX} = f(U_{BX})$  операційного підсилювача

Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП наведена на рисунку 7.3.

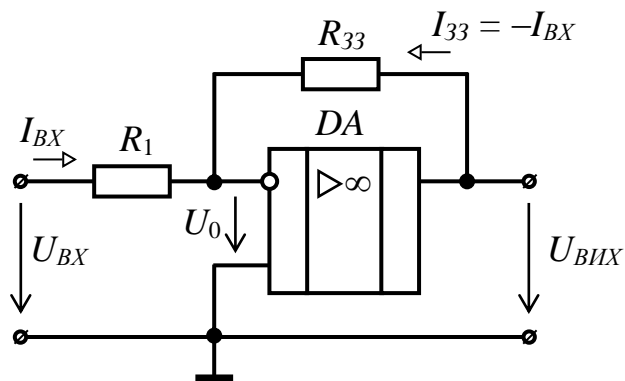


Рисунок 7.3 – Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП

У цій схемі вхідний сигнал подається на інвертуючий вхід ОП, а його неінвертуючий вхід з'єднаний з спільною точкою входу і виходу схеми. Підсилювач називається інвертуючим, оскільки вихідна напруга інвертована (знаходиться в протифазі) по відношенню до вхідної напруги  $U_{BX}$ . Від'ємний зворотний зв'язок створюється за допомогою резистора  $R_{33}$ .

Коефіцієнт підсилення за напругою інвертуючого підсилювача визначається параметрами тільки пасивної частини схеми

$$K_U = \frac{U_{BHX}}{U_{BX}} = -\frac{R_{33}}{R_1} = -\frac{1}{\beta}, \quad (7.1)$$

де  $\beta = \frac{R_1}{R_{33}}$  – коефіцієнт передачі кола 33.

Неінвертуючий підсилювач (рисунок 7.4) містить послідовний ВЗЗ за напругою (резистор  $R_{33}$ ), який поданий на інвертуючий вхід, а вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід ОП.

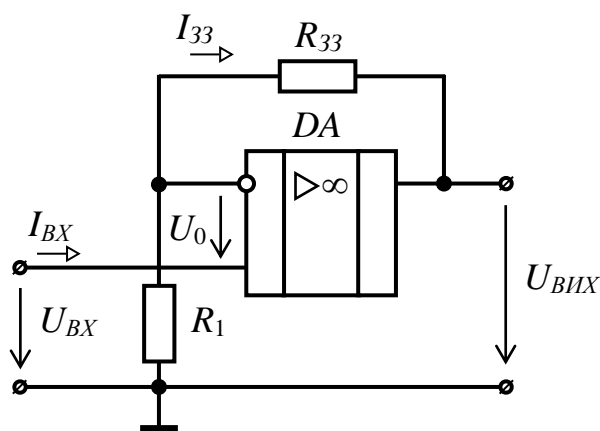


Рисунок 7.4 – Схема неінвертуючого підсилювача на основі ОП

Коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача

$$K_U = \frac{U_{BHX}}{U_{BX}} = \frac{R_1 + R_{33}}{R_1} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (7.2)$$

## 7.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення та умовне графічне позначення операційного підсилювача.

2. Привести схему інвертуючого підсилювача на ОП. Визначити величину опору резистора  $R_1$  на інвертуючому вході ОП при заданих значеннях коефіцієнта підсилення  $K_U$  і опору резистора в колі зворотного зв'язку  $R_{33}$ . Побудувати графік залежності  $U_{BHX} = f(U_{BX})$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 7.1. Максимальну вихідну напругу ОП прийняти  $U_{BHX, \max} = \pm 11$  В.

3 Привести схему неінвертуючого підсилювача на ОП. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача при величині опорів резисторів  $R_1$  і  $R_{33}$  з п. 2. Побудувати графік залежності  $U_{BHX} = f(U_{BX})$ .

Таблиця 7.1 – Вихідні дані

№ вар.	$K_U$	$R_{33}$ , кОм	№ вар.	$K_U$	$R_{33}$ , кОм
1	8	50	16	10	125
2	9	55	17	11	130

3	10	60	18	12	135
4	11	65	19	13	140
5	12	70	20	14	145
6	13	75	21	15	150
7	14	80	22	16	155
8	15	85	23	17	160
9	16	90	24	18	165
10	17	95	25	19	170
11	18	100	26	20	175
12	19	105	27	21	180
13	20	110	28	8	185
14	8	115	29	9	190
15	9	120	30	10	195

### 7.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження операційного підсилювача (рисунк 7.5).

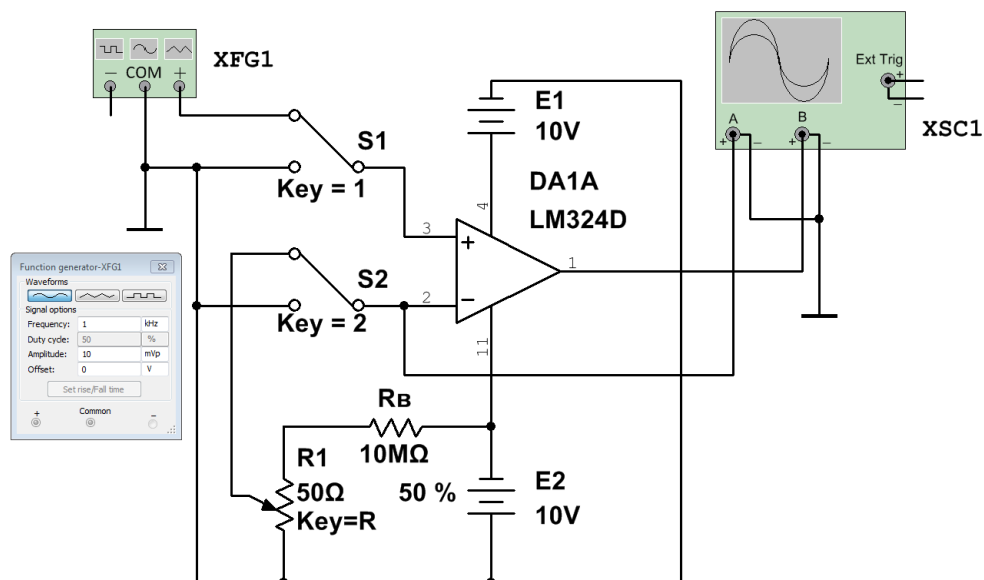


Рисунок 7.5 – Схема для дослідження ОП

2. Установити задані в таблиці 7.1 і розраховані в п. 7.2 параметри елементів схеми і віртуального генератора.

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми, встановити кольоровою.

4. Включити схему. Перемикачі S1 і S2 установити в нижнє положення. Якщо напруга на виході ОП відмінна від нульової

( $U_{BIX} \neq 0$ ), те необхідно перемикач  $S2$  установити у верхнє положення та за допомогою резистора  $R1$  добитися  $U_{BIX} = 0$ .

5. Перемикач  $S1$  установити у верхнє положення і зняти осцилограми вхідної  $u_{BX} = f(t)$  і вихідної  $u_{BIX} = f(t)$  напруг ОП. За допомогою візирної лінії віртуального осцилографа виміряти амплітуди напруг і обчислити коефіцієнт підсилення ОП.

6. Набрати схему для дослідження інвертуючого підсилювача (рисунок 7.6).

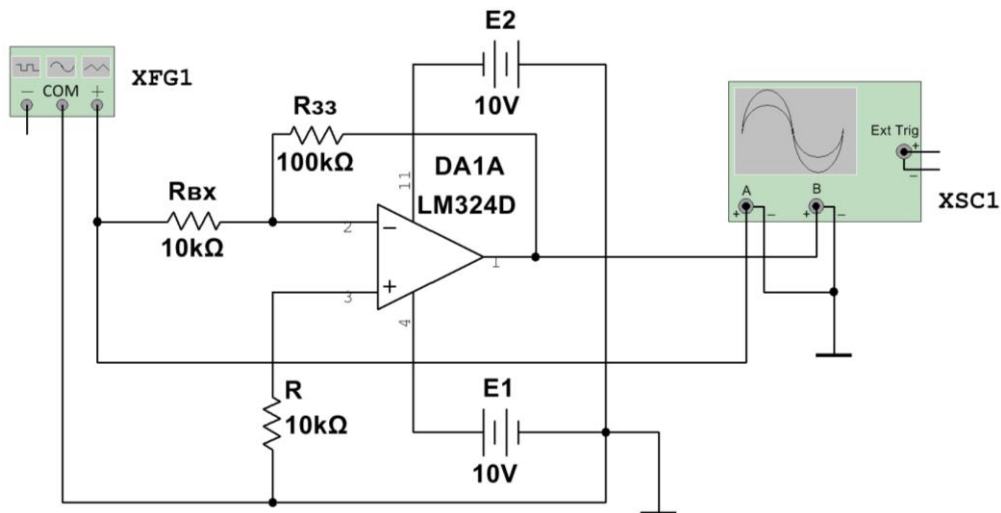


Рисунок 7.6 – Схема для дослідження інвертуючого ОП

7. Установити задані в таблиці 7.1 і розраховані в п. 7.2 параметри елементів схеми.

8. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з виходом ОП, установити кольоровою.

9. Включити схему. За допомогою віртуального осцилографа зняти залежність вихідної напруги операційного підсилювача від вхідної:  $U_{BIX} = f(U_{BX})$ . Результати вимірів занести в таблицю 7.2.

10. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 7.8). Визначити коефіцієнт підсилення ОП за напругою  $K_U$ .

11. Набрати схему для дослідження неінвертуючого підсилювача (рисунок 7.7).

Таблиця 7.2 – Результати експериментальних досліджень операційного підсилювача

$U_{BX}, \text{В}$	Інвертуючий підсилювач	Неінвертуючий підсилювач
	$U_{BIX}, \text{В}$	$U_{BIX}, \text{В}$

0,1		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		
0,8		
0,9		
1,0		
1,1		
1,2		

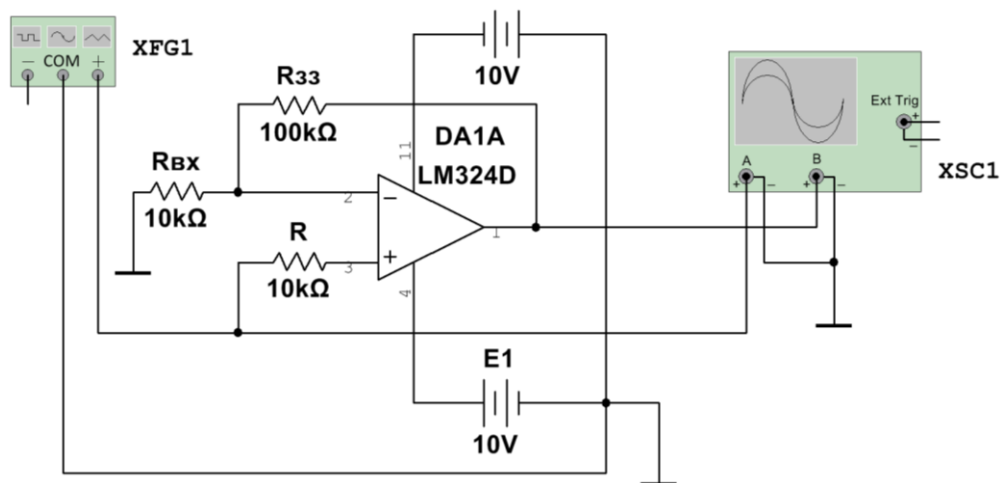


Рисунок 7.7 – Схема для дослідження неінвертуючого ОП

12. Виконати пп. 7-10.

13. За даними таблиці 7.2 побудувати графіки залежності  $U_{вих} = f(U_{вх})$  для інвертуючого і неінвертуючого підсилювачів.



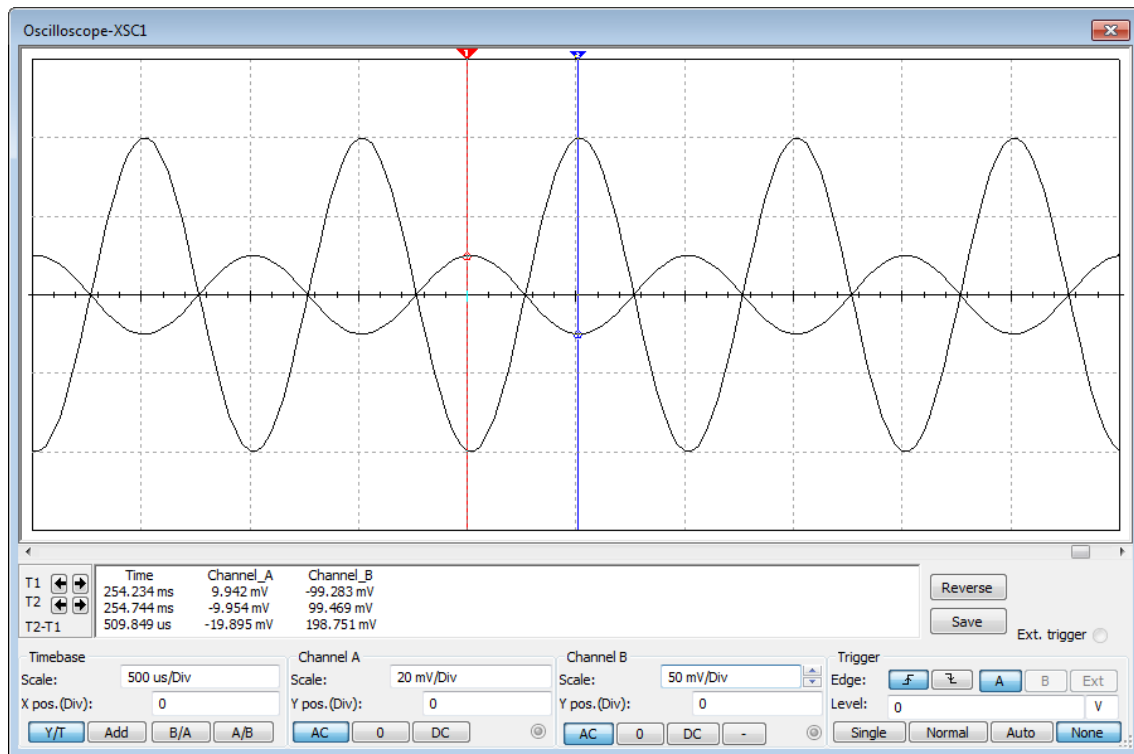


Рисунок 7.8 – Осцилограми напруг інвертуючого ОП

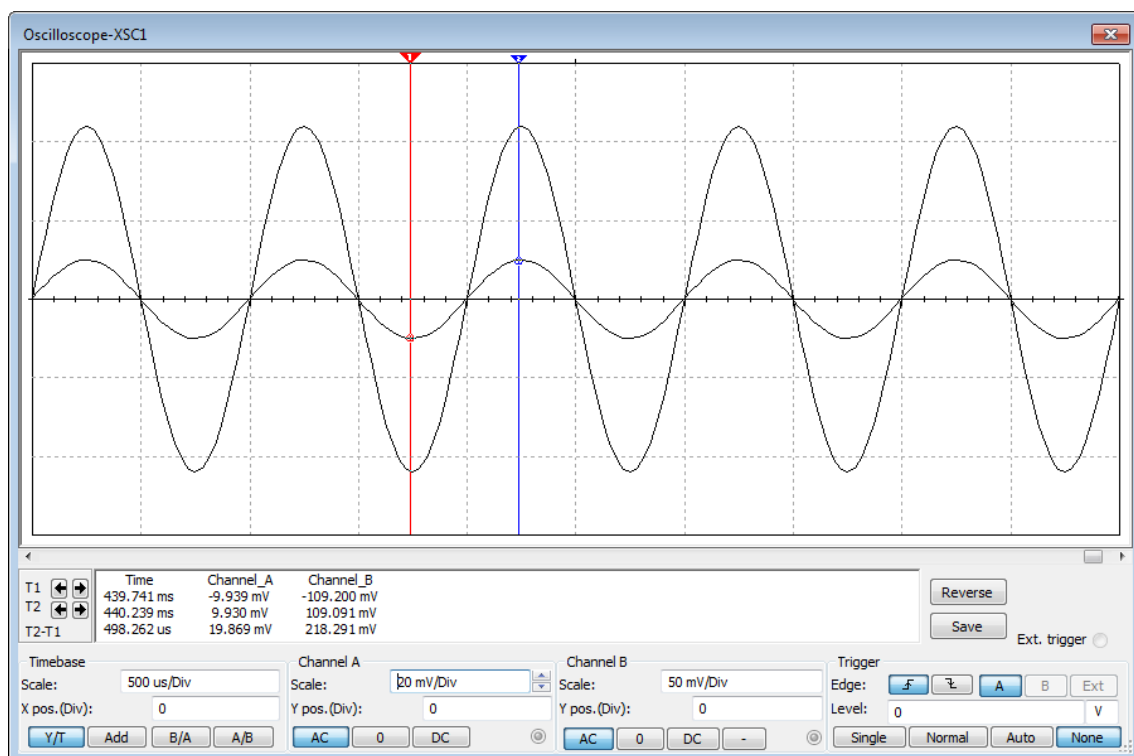


Рисунок 7.9 – Осцилограми напруг неінвертуючого ОП

## Контрольні питання

1. Поясніть призначення підсилювачів постійного струму.
2. Поясніть, що таке операційний підсилювач і як він побудований?
3. Поясніть призначення операційних підсилювачів.
4. Наведіть умовне графічне позначення та поясніть призначення виводів операційного підсилювача.
5. Наведіть основні параметри і характеристики операційного підсилювача.
6. Наведіть схему та поясніть принцип дії інвертуючого підсилювача на ОП.
7. Наведіть схему та поясніть принцип дії неінвертуючого підсилювача на ОП.
8. Наведіть схеми та поясніть принцип дії інвертуючого і неінвертуючого суматорів на ОП.
9. Наведіть схему та поясніть принцип дії інтегруючого підсилювача на ОП.
10. Наведіть схему та поясніть принцип дії диференціюючого підсилювача на ОП.
11. Поясніть, яку роль виконує зворотний зв'язок в операційному підсилювачі?
12. Поясніть, як впливає зворотний зв'язок в операційному підсилювачі на його передатну характеристику?
13. Поясніть, у чому полягає відмінність операційних підсилювачів від звичайних?

## 8 ГЕНЕРАТОРИ СИНУСОЇДАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ

**Мета роботи:** Вивчення принципу роботи і дослідження генераторів синусоїдальних (гармонійних) коливань.

### 8.1 Загальні теоретичні відомості

**Генератор синусоїдальних (гармонійних) коливань** – це електронний пристрій, який перетворює електричну енергію джерела постійного струму в енергію електричних синусоїдальних коливань заданої частоти.

Розрізняють генератори синусоїдальних коливань з незалежним збудженням і з самозбудженням (автогенератори). Залежно від часто-

ти коливань, що генерується, генератори підрозділяються на низько-частотні (від 10 Гц до 100 кГц), високочастотні (від 100 кГц до 100 МГц) та надвисокочастотні (понад 100 МГц).

За типом частотно-вибіркової кола, які задають частоту коливань, генератори гармонійних коливань поділяються на *LC*- і *RC*-генератори.

Будь-яким автогенератором електричних коливань є підсилювач, який охоплений колом додатного зворотного зв'язку (ДЗЗ). Умовою існування в генераторі незатухаючих електричних коливань є рівняння

$$K_U \cdot \beta = 1. \quad (8.1)$$

Ця умова підрозділяється на умову балансу амплітуд ( $K_U \cdot \beta = 1$ ) і на умову балансу фаз ( $\varphi_U + \varphi_\beta = 2\pi n$ , де  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

*LC*-генератори призначені для генерування сигналів високої частоти і містять в ланцюзі ДЗЗ резонансний *LC*-контур, параметри якого визначають частоту коливань вихідної напруги

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (8.2)$$

Для отримання гармонійних коливань низької частоти застосовують генератори, у яких в ланці зворотного зв'язку використовуються частотно-вибіркові кола, що складені з резисторів і конденсаторів. Частотно-вибірковими ланками, які найчастіше використовуються в *RC*-генераторах, є *Г*-подібні *RC*-кола, міст Віна та подвійний *T*-подібний міст.

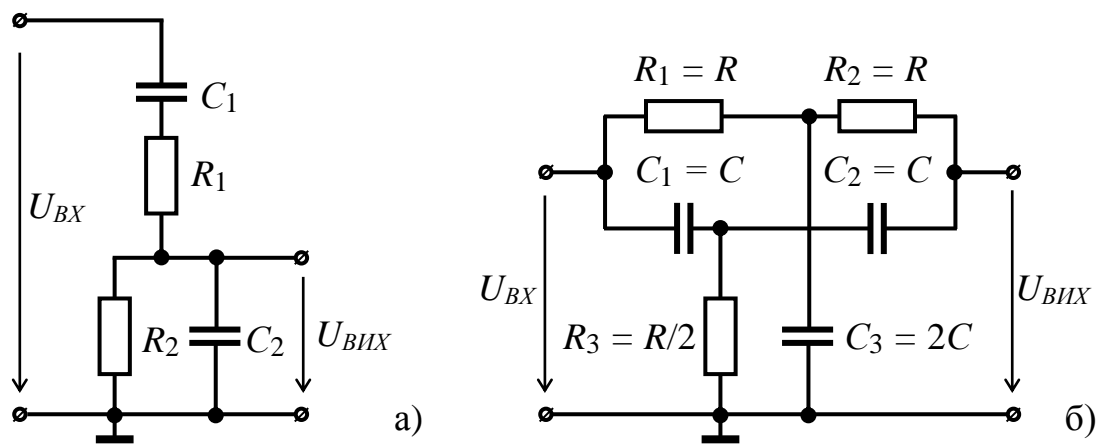
Схеми частотно-вибіркових кіл *RC*-генераторів наведені на рисунку 8.1.

Частота генерації *RC*-генераторів дорівнює квазірезонансній частоті частотно-вибіркового кола

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (8.3)$$

де  $R1 = R2 = R$  і  $C1 = C2 = C$ .

Схема *RC*-генератора на операційному підсилювачі з мостом Віна наведена на рисунку 8.2. Коло частотно-вибіркового зворотного зв'язку повинне бути увімкнене між виходом і неінвертуючим входом ОП. Резистори *R3* і *R4* призначені для отримання необхідного коефіцієнта підсилення. За допомогою змінного резистора *R4* можна змінювати коефіцієнт підсилення підсилювача, добиваючись при цьому найменших нелінійних викривлень генерованих коливань.



а – міст Віна; б – двійний  $T$ -подібний міст

Рисунок 8.1 – Частотно-вибіркові кола  $RC$ -генераторів

Оскільки на частоті генерації  $f_0$  коефіцієнт передачі моста Віна  $\beta = 1/3$ , то самозбудження генератора можливе при  $K_U > 3$ .

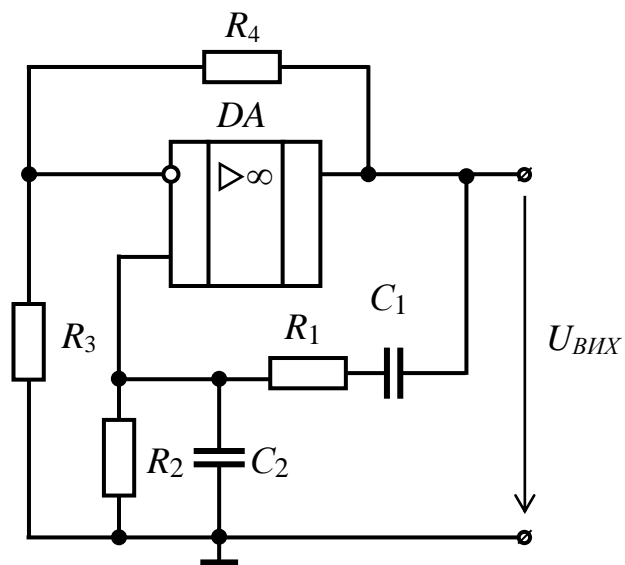


Рисунок 8.3 – Схема  $RC$ -генератора з мостом Віна

## 8.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення, класифікацію та умови самозбудження генераторів синусоїдальних коливань.

2. Привести схему  $LC$ -генератора синусоїдальних коливань на біполярному транзисторі, виконаного за схемою “ємнісна триточка”. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи генератора.

3. Визначити частоту коливань генератора за виразом 8.2. Варіанти завдань наведені в таблиці 8.1.

4. Привести схему і характеристики (амплітудно-частотну і фазочастотну) моста Віна.

5. Привести схему  $RC$ -генератора синусоїдальних коливань на операційному підсилювачі з мостом Віна. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи генератора.

6. Визначити частоту коливань генератора за виразом 8.3. Варіанти завдань наведені в таблиці 8.1.

Таблиця 1 – Вихідні дані

№ вар.	$LC$ -генератор			$RC$ -генератор		№ вар.	$LC$ -генератор			$RC$ -генератор	
	$L$ , Гн	$C_1 = C_2$ , мкФ	$C$ , мкФ	$C$ , мкФ	$R$ , Ом		$L$ , Гн	$C_1 = C_2$ , мкФ	$C$ , мкФ	$C$ , мкФ	$R$ , Ом
1	2,0	1,0	0,2	0,5	20	16	1,6	2,5	0,3	2,0	5
2	1,9	1,1	0,2	0,6	19	17	1,5	2,6	0,3	2,1	20
3	1,8	1,2	0,2	0,7	18	18	1,4	2,7	0,3	2,2	19
4	1,7	1,3	0,2	0,8	17	19	1,3	2,8	0,3	2,3	18
5	1,6	1,4	0,2	0,9	16	20	1,2	2,9	0,3	2,4	17
6	1,5	1,5	0,2	1,0	15	21	1,1	3,0	0,3	2,5	16
7	1,4	1,6	0,25	1,1	14	22	1,0	3,1	0,3	2,6	15
8	1,3	1,7	0,25	1,2	13	23	0,9	3,2	0,3	2,7	14
9	1,2	1,8	0,25	1,3	12	24	0,8	3,3	0,3	2,8	13
10	1,1	1,9	0,25	1,4	11	25	0,7	3,4	0,3	2,9	12
11	1,0	2,0	0,25	1,5	10	26	0,6	3,5	0,3	3,0	11
12	2,0	2,1	0,3	1,6	9	27	0,5	3,6	0,35	3,1	10
13	1,9	2,2	0,3	1,7	8	28	0,6	3,7	0,35	3,2	9
14	1,8	2,3	0,3	1,8	7	29	0,7	3,8	0,35	3,3	8
15	1,7	2,4	0,3	1,9	6	30	0,8	3,9	0,35	3,4	7

### 8.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження LC-генератора (рисунок 8.4).

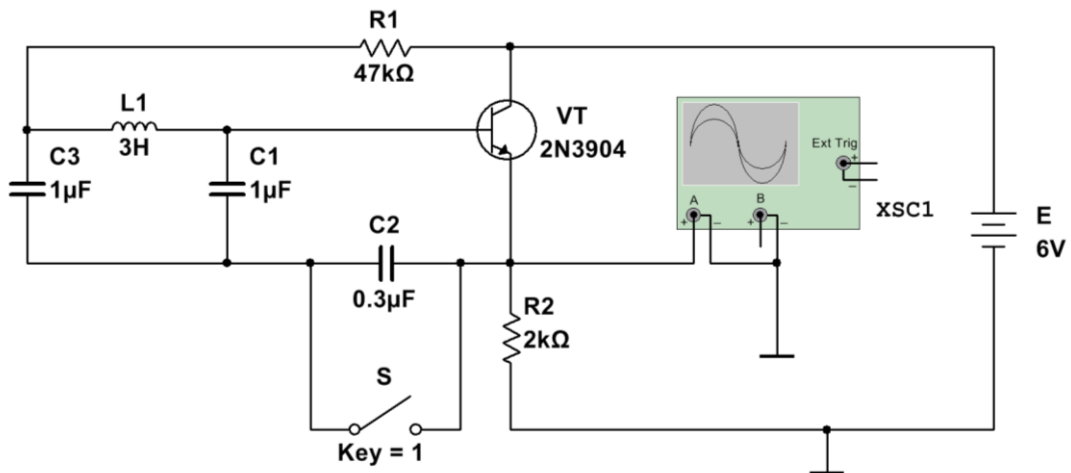


Рисунок 8.4 – Схема для дослідження LC-генератора, який виконаний за схемою “ємнісна триточка”

2. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця 8.1).
3. Включити схему. Для прискорення виникнення коливань генератора перемикачем S короткочасно замкнути конденсатор C2.
4. Привести осцилограму вихідної напруги  $u_{ВИХ} = f(t)$  (див. рисунок 8.5).
5. За допомогою візирних ліній осцилографа визначити амплітуду і період синусоїдальних коливань. Обчислити частоту коливань [ $f = 1/T$ ].
6. Набрати схему для зняття амплітудно-частотної (АЧХ) і фазочастотної (ФЧХ) характеристик моста Віна (рисунок 8.6). Установити задані параметри елементів моста Віна (таблиця 8.1).

**Примітка:** Зняття АЧХ і ФЧХ здійснюється за допомогою вимірювача АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter). Вимірювач призначений для аналізу амплітудно-частотних (при натиснутій кнопці «Magnitude») і фазочастотних (при натиснутій кнопці «Phase») характеристик при логарифмічній (кнопка «Log») або лінійній (кнопка «Lin») шкалі по осях Y («Vertical») і X («Horizontal»). Настроювання вимірювача полягає у виборі меж вимірювання коефіцієнта передачі і варіації частоти за допомогою кнопок у віконцях «F» – максимальне та «I» – мінімальне значення. Значення частоти і відповідне їй значення коефіцієнта пере-

дачі або фази показується у віконцях у правому нижньому куті вимірювача. Підключення приладу до досліджуваної схеми здійснюється за допомогою затискачів «IN» (вхід) і «OUT» (вихід). Ліві клема затискачів підключаються відповідно до входу і виходу досліджуваного пристрою, а праві – до спільної шини.

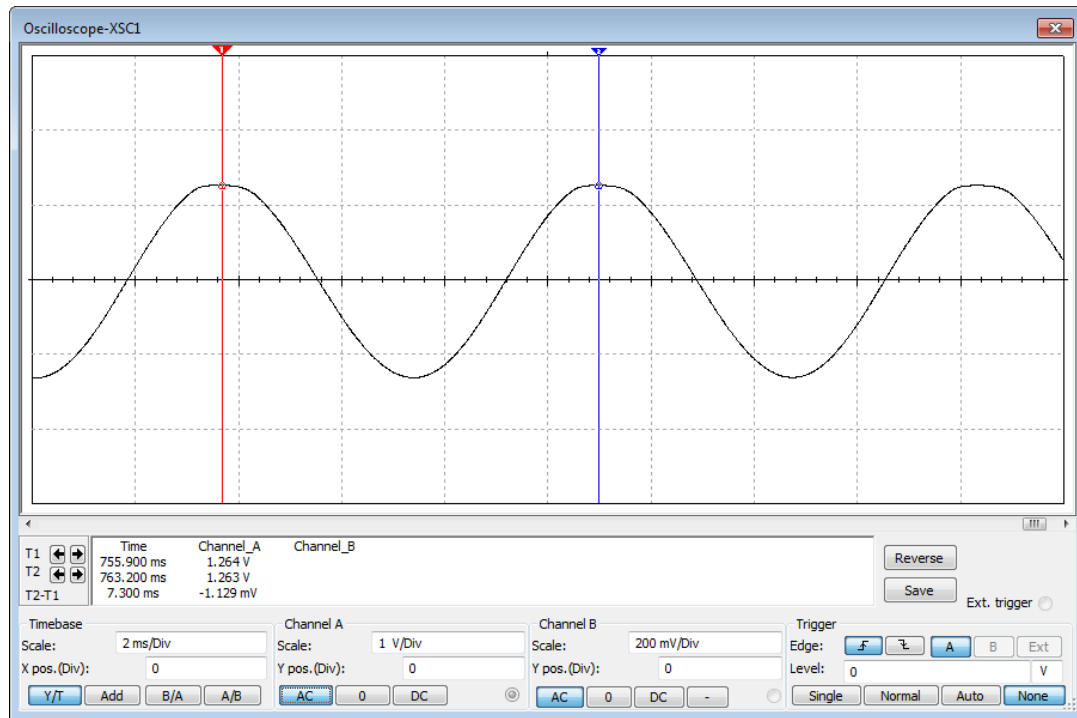


Рисунок 8.5 – Осцилограма напруги  $LC$ -генератора

7. З вимірювача АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter) привести амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики моста Віна (див. рисунок 8.6). Записати значення частоти і відповідне їй значення коефіцієнта передачі і фази.

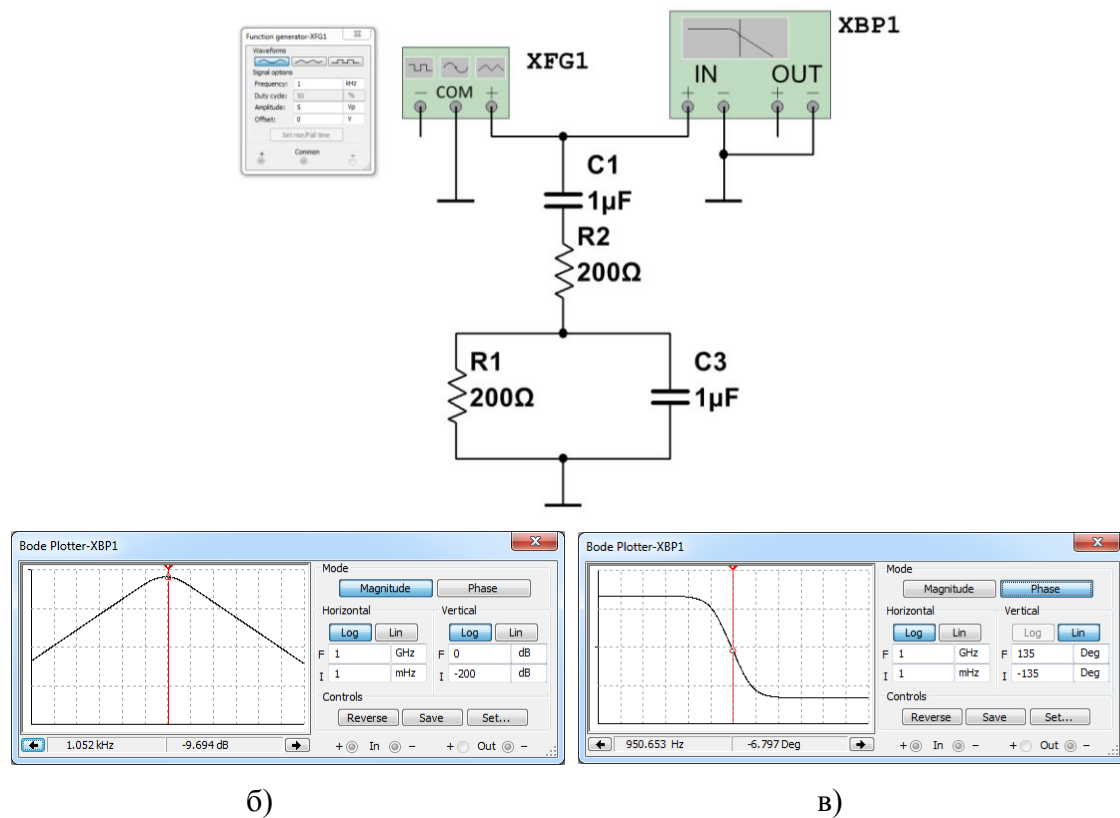
**Примітка:** вимірювання коефіцієнта передачі і фази проводиться при резонансній частоті.

8. Набрати схему для дослідження  $RC$ -генератора синусоїдальних коливань на операційному підсилювачі з мостом Віна (рисунок 8.8).

9. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця 8.1).

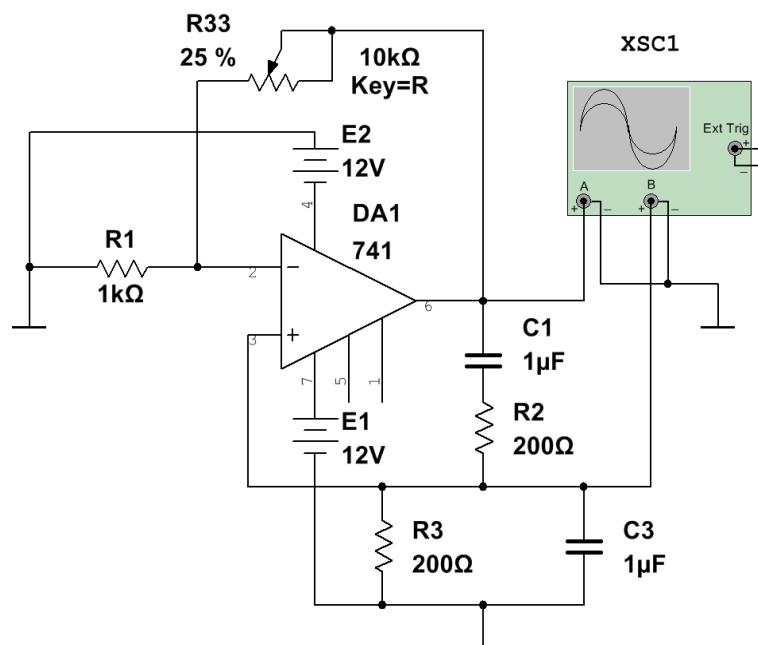
10. Лінію, що з'єднує вхід "А" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

11. Включити схему. Привести осцилограми напруг на виході генератора і моста Віна (див. рисунок 8.9).



а) схема; б) АЧХ; в) ФЧХ

Рисунок 8.6 – Міст Віна





12. За допомогою візирних ліній осцилографа визначити амплітуду і період синусоїдальних коливань на виході генератора і моста Віна. Обчислити частоту коливань і коефіцієнт передачі моста Віна [ $\beta = U_{ВИХ}/U_{ВХ}$ , де  $U_{ВИХ}$  і  $U_{ВХ}$  – вихідна і вхідна напруга моста Віна].

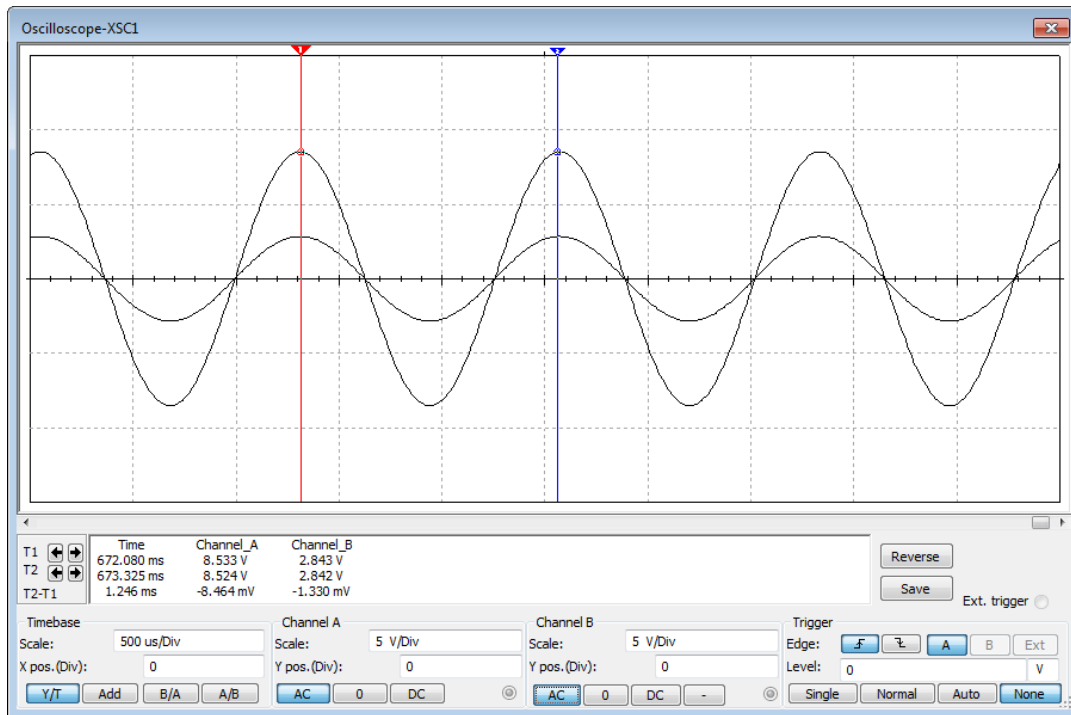


Рисунок 8.9 – Осцилограми напруг на виході  $RC$ -генератора і моста Віна

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення генераторів синусоїдальних коливань.
2. Наведіть класифікацію генераторів синусоїдальних коливань.
3. Наведіть структурну схему генератора синусоїдальних коливань.
4. Наведіть умови виникнення в генераторі незатухаючих електричних коливань
5. Наведіть основні параметри і характеристики генераторів синусоїдальних коливань.
6. Поясніть призначення  $LC$ - та  $RC$ -генераторів.
7. Наведіть схему моста Віна, його амплітудно- і фазо-частотну характеристики.
8. Наведіть схему подвійного  $T$ -подібного моста, його амплітудно-частотну характеристику.

9. Наведіть схему  $RC$ -генератора з подвійним  $T$ -подібним мостом на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
10. Наведіть схему  $RC$ -генератора з мостом Віна на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.

## 9 ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ. ТРИГЕРИ

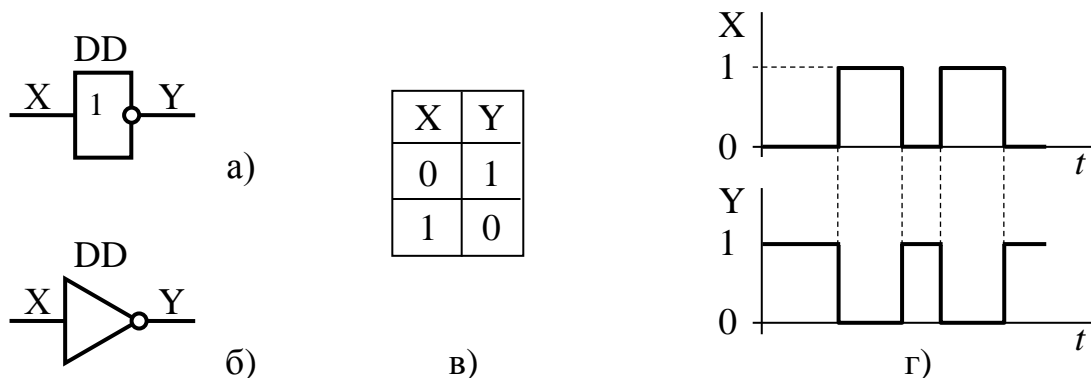
**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження логічних елементів і тригерів в інтегральному виконанні.

## 9.1 Загальні теоретичні відомості

**Логічні елементи** – це електронні схеми, які відтворюють логічні функції і оперують логічними величинами, які приймають тільки два значення: логічну одиницю та логічний нуль.

Логічній одиниці «1» відповідає рівень високої напруги, а логічному «0» – рівень низької напруги.

Умовне позначення логічного елементу НІ, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 9.1. Сигналу  $X = 0$  на вході відповідає  $Y = 1$  на виході і, навпаки, при  $X = 1$ ,  $Y = 0$ .



а – умовне графічне позначення ГОСТ; б – умовне графічне позначення ANSI; в – таблиця істинності; г – часові діаграми роботи

Рисунок 9.1 – Логічний елемент НІ

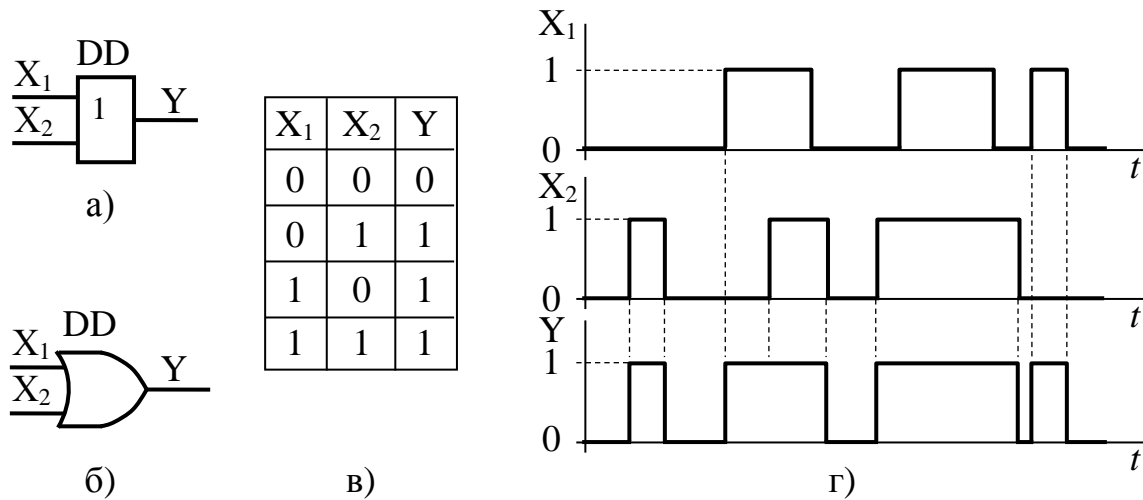
Умовне позначення логічного елементу АБО, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 9.2.

Вихідний сигнал  $Y$  елементу АБО дорівнює одиниці  $Y = 1$ , якщо хоч би на один з входів поданий сигнал логічної «1».

Умовне позначення логічного елементу І, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 9.3.

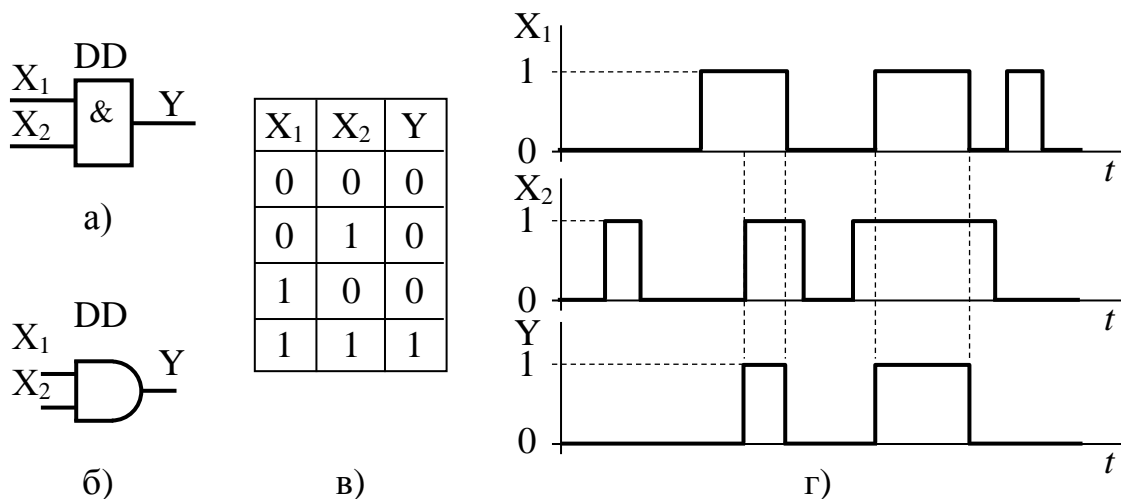
Вихідний сигнал  $Y$  елементу І дорівнює одиниці  $Y = 1$ , якщо одночасно на всі входи поданий сигнал логічної «1».

Умовне позначення логічного елементу АБО-НІ, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 9.4.



а – умовне графічне позначення ГОСТ; б – умовне графічне позначення ANSI; в – таблиця істинності; г – часові діаграми роботи

Рисунок 9.2 – Логічний елемент АБО

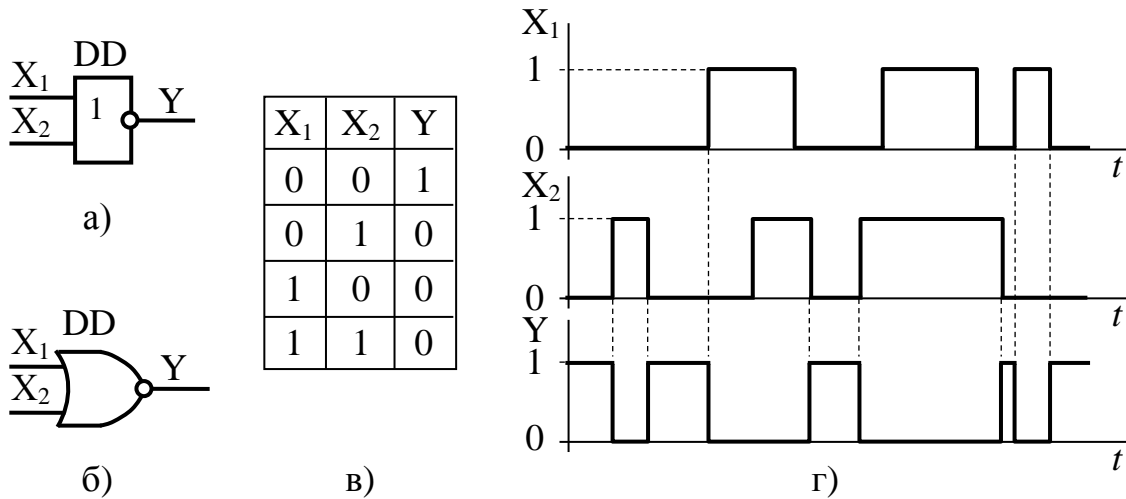


а – умовне графічне позначення ГОСТ; б – умовне графічне позначення ANSI; в – таблиця істинності; г – часові діаграми роботи

Рисунок 9.3 – Логічний елемент І

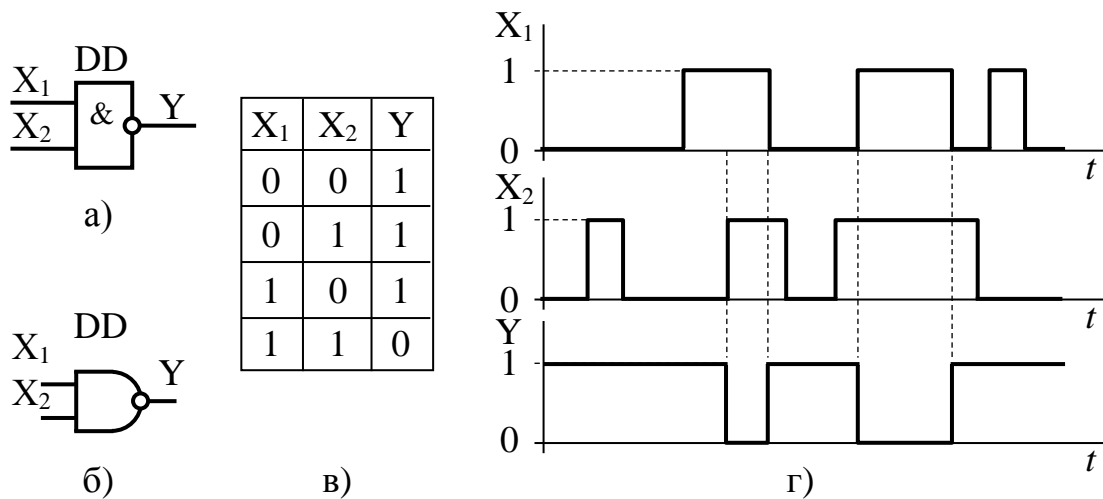
Логічний елемент АБО-НІ об'єднує елементи АБО і НІ. У зв'язку з цим входні сигнали, які дорівнюють логічній «1», відповідає логічний «0» на виході, а при сигналах логічного "0" на всіх входах вихідний  $Y = 1$ .

Умовне позначення логічного елементу І-НІ, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 9.5.



а – умовне графічне позначення ГОСТ; б – умовне графічне позначення ANSI; в – таблиця істинності; г – часові діаграми роботи

Рисунок 9.4 – Логічний елемент АБО-НІ



а – умовне графічне позначення ГОСТ; б – умовне графічне позначення ANSI; в – таблиця істинності; г – часові діаграми роботи

Рисунок 9.5 – Логічний елемент І-НІ

Логічний елемент І-НІ об'єднує елементи І та НІ. Логічний «1» на всіх входах відповідає логічний «0» на виході елементу. При логічному «0» на одному з входів створюється логічна «1» на виході.

**Тригер** – це пристрій, що має два стійких вихідних стани і здатний переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу.

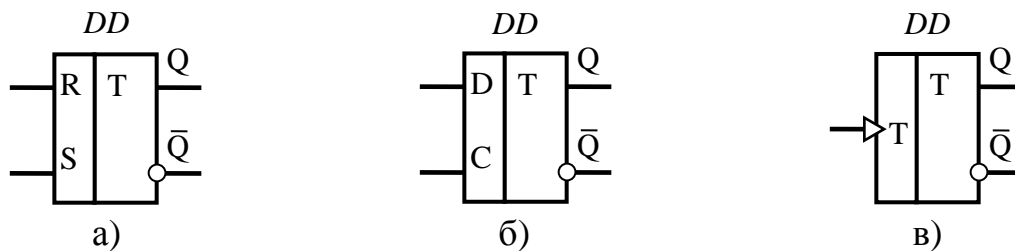
За функціональною ознакою розрізняють тригери типів *RS*, *D*, *T*, *JK* та інші. За способом керування тригери підрозділяють на асинхронні та тактовані.

В асинхронних тригерах перемикання з одного стану в інше здійснюється безпосередньо з надходженням сигналу на інформаційний вхід.

В тактованих тригерах крім інформаційних входів є вхід тактових імпульсів. Їх перемикання проводиться тільки за наявності дозволяючого, тактового імпульсу.

Асинхронний **RS-тригер** (рисунок 9.6, а), як і тригер будь-якого іншого типу, характеризується двома станами: логічної «1» та логічного «0».

Стану логічної «1» відповідає  $Q = 1$ ,  $\bar{Q} = 0$ ; стану логічного «0»:  $Q = 0$ ,  $\bar{Q} = 1$ , де  $Q$  – прямий, а  $\bar{Q}$  – інверсний виходи.



а) асинхронний *RS*-тригер, б) *D*-тригер; в) *T*-тригер

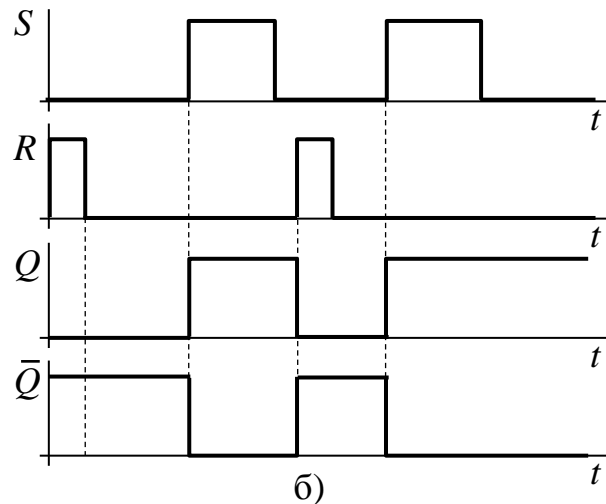
Рисунок 9.6 – Умовні позначення

По інформаційному входу *S* проводиться установка тригера в стан логічної «1», а по інформаційному входу *R* – установка (перехід тригера в початковий стан) логічного «0». Цьому відповідають скорочені позначення входів і назва тригера: *S* (set) – установка, *R* (reset) – повернення в початковий стан. Роботу тригера ілюструє таблиця станів та часові діаграми, які наведені на рисунку 9.7.

Стан логічної «1» ( $Q = 1$ ) тригер приймає при  $S = 1$ ,  $R = 0$ . При зворотній комбінації входних сигналів ( $S = 0$ ,  $R = 1$ ) тригер встановлюється в стан логічного «0» ( $Q = 0$ ). При комбінації  $S = R = 0$  в тригері зберігається попередній стан («0» або «1»). Комбінація  $S = R = 1$  для тригера є забороненою зважаючи на невизначеність його стану.

$t^n$		$t^{n+1}$	
$S$	$R$	$Q^{n+1}$	$\bar{Q}^{n+1}$
1	0	1	0
0	1	0	1
0	0		
1	1	×	×

а)



б)

а) таблиця станів; б) часові діаграми роботи

$t^n$  – значення входних сигналів у деякий момент часу;  $t^{n+1}$  – стан тригера в наступний момент часу після приходу чергових імпульсів

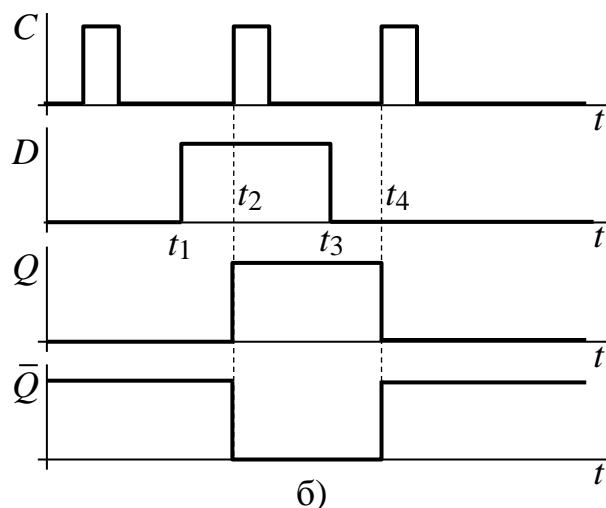
Рисунок 9.7 – RS-тригер

**D-тригери** (рисунок 9.6, б) мають один інформаційний вхід ( $D$ -вхід, на який подається інформація, призначена для занесення в тригер) та вхід синхронізації ( $C$ -вхід) або тактовий вхід.

Роботу тактованого  $D$ -тригера ілюструють таблиця станів та часові діаграми (рисунок 9.8).

$t^n$		$t^{n+1}$	
$C$	$D$	$Q^{n+1}$	$\bar{Q}^{n+1}$
0	0	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0
0	1	1	0

а)



б)

а) таблиця станів; б) часові діаграми роботи

$Q^{n+1}$  – логічний рівень на даному виході після подачі імпульсу синхронізації

Рисунок 9.8 – D-тригер

Якщо рівень сигналу на вході  $C = 0$ , стан тригера стійкий і не залежить від рівня сигналу на інформаційному вході. Під час подачі на вхід синхронізації рівня  $C = 1$  інформація на прямому виході повторюватиме інформацію, що подається на вхід  $D$ . Таким чином, перемикання тригера з одного стійкого стану в інше відбувається з появою синхронізуючого (тактового) імпульсу на вході  $C$ .

**$T$ -тригер** (рисунок 9.6, в) має один керуючий вхід  $T$  і два виходи  $Q$  та  $\bar{Q}$ . Характерною властивістю  $T$ -тригера є його перемикання в протилежний стан з приходом кожного чергового вхідного імпульсу. Його називають також тригером з лічильним запуском.

На рисунку 9.9 наведені часові діаграми, що пояснюють принцип дії  $T$ -тригера.

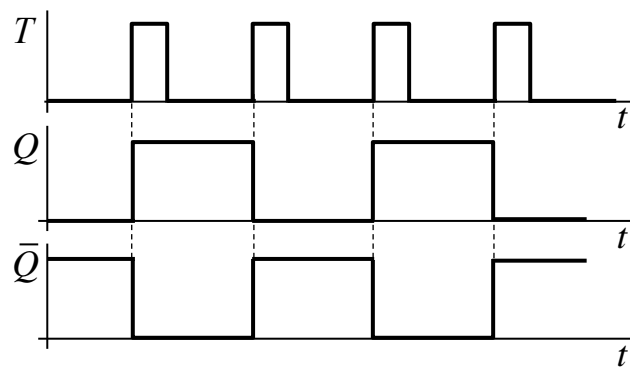


Рисунок 9.9 – Часові діаграми роботи  $T$ -тригера

З приходом першого імпульсу на вхід  $T$  тригер встановлюється в стан логічної «1» ( $Q = 1$ ). Другим імпульсом тригер перемикається в стан логічного «0» і так далі. Як видно з діаграми (рисунок 9.9), частота сигналу на виході  $T$ -тригера в два рази нижче за частоту сигналу на вході, тому такий тригер можна використовувати як дільник частоти, а також в лічильниках числа імпульсів.

Універсальні  **$JK$ -тригери** – це пристрої з двома інформаційними входами  $J$  і  $K$ , які у разі вхідної комбінації  $J = K = 1$  перемикають тригер в протилежний стан подібно  $T$ -тригеру, а при будь-яких інших комбінаціях вони функціонують як  $RS$ -тригер, у якого роль входів  $S$  і  $R$  виконують відповідно входи  $J$  і  $K$ :  $J \equiv S$ ,  $K \equiv R$ .

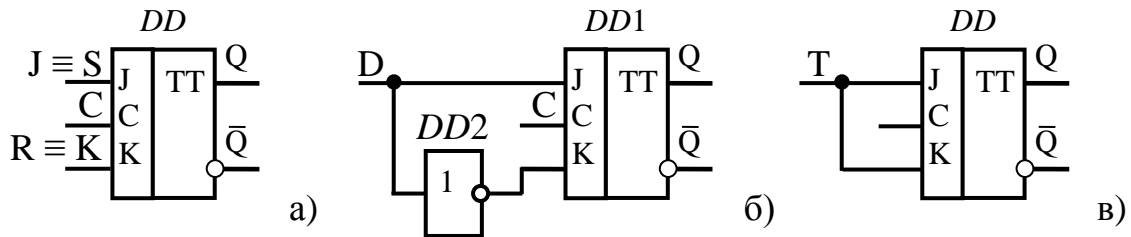
При відповідному підключенні входів  $JK$ -тригер може виконувати функції  $R$ - $S$ ,  $D$ - і  $T$ -тригерів (рисунок 9.11).

$RS$ -тригер отримують подачею на вхід  $J$  сигналу  $S$ ; а на вхід  $K$  сигналу  $R$ .  $D$ -тригер утворюється введенням інвертора в коло входу  $K$ .

Якщо входи  $J$  і  $K$  об'єднати і подати на них лічильні імпульси  $T$ , отримаємо  $T$ -тригер з лічильним запуском.

У цьому полягає універсальність  $JK$ -тригера.

Інтегральні тригери застосовують при побудові складних функціональних пристроїв: лічильників імпульсів, регістрів, пристроїв, що запам'ятовують, дільників частоти і т.д.



а –  $RS$ -тригер; б –  $D$ -тригер; в –  $T$ -тригер

Рисунок 9.10 – Реалізація тригерів за допомогою універсального  $JK$ -тригера

## 9.2 Завдання для самостійної підготовки

### 9.2.1 Для логічних елементів

1. Описати функціональне призначення логічних елементів: НІ, АБО, АБО-НІ, І, І-НІ, Виключне АБО.
2. Привести умовні графічні позначення зазначених логічних елементів.
3. Скласти таблиці істинності логічних елементів.
4. Побудувати часові діаграми роботи логічних елементів.

### 9.2.2 Для тригерів

1. Описати функціональне призначення:  $RS$ -,  $D$ -,  $T$ - і  $JK$ - тригерів.
2. Привести умовне графічне позначення зазначених тригерів.
3. Скласти таблиці переходів (стану) тригерів. Таблиця переходів показує стан  $Q^n$  тригера в деякий момент часу  $t^n$  і стан  $Q^{n+1}$  тригера в наступний момент часу  $t^{n+1}$  після подачі чергових імпульсів.
4. Побудувати часові діаграми роботи тригерів.
5. Записати в таблицю 9.1 стан («0» або «1») логічних елементів і тригерів у схемі, наведеної на рисунку 9.11. Варіанти завдань наведені в таблиці 9.2.



Таблиця 9.1 – Вихідні сигнали логічних елементів і тригерів

Виходи	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Q1	Q'1	Q2	Q'2
Стан											

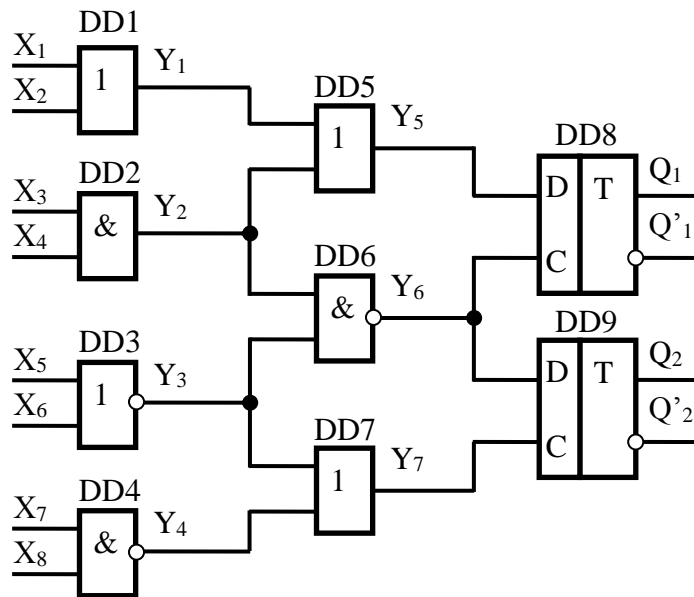


Рисунок 9.11 – Схема на логічних елементах і тригерах

Таблиця 9.2 – Вихідні дані

№ вар	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	№ вар	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
1	0	1	1	1	0	1	1	0	16	1	0	0	0	0	1	0	1
2	1	1	1	1	0	1	0	1	17	0	1	1	1	1	1	1	0
3	0	0	1	1	0	1	1	1	18	1	1	1	1	1	1	0	0
4	1	0	1	1	0	1	0	1	19	0	0	1	1	1	1	1	1
5	0	1	0	1	0	1	1	0	20	1	0	1	1	1	1	0	1
6	1	1	0	1	0	1	0	0	21	0	1	0	1	1	1	1	0
7	0	0	0	1	0	1	1	1	22	1	1	0	1	1	1	0	0
8	1	0	0	1	0	1	0	1	23	0	0	0	1	1	1	1	1
9	0	1	1	0	0	1	1	0	24	1	0	0	1	1	1	0	1
10	1	1	1	0	0	1	0	0	25	0	1	1	0	1	1	1	0
11	0	0	1	0	0	1	1	1	26	1	1	1	0	1	1	0	0
12	1	0	1	0	0	1	0	1	27	0	0	1	0	1	1	1	1
13	0	1	0	0	0	1	1	0	28	1	0	1	0	1	1	0	1
14	1	1	0	0	0	1	0	0	29	0	1	0	0	1	1	1	0
15	0	0	0	0	0	1	1	1	30	1	1	0	0	1	1	0	0

## 9.3 Порядок виконання роботи

### 9.3.1 Дослідження логічних елементів

1. Запустити програму Multisim. Набрати на робочому полі програми схеми для дослідження логічних елементів (рисунок 9.12). У схемах двохпозиційні перемикачі  $S1$  і  $S2$  подають на входи логічних елементів рівні логічного «0» (контакт перемикача в нижньому положенні) або логічної «1» (контакт перемикача у верхньому положенні).

2. Включити схему. Подаючи перемикачами  $S1, S2$  на входи логічних елементів напруги логічного «0» та «1» і, спостерігаючи рівні сигналів на виході «Y» за допомогою логічних пробників ( $X1, X2, Y$ ), заповнити таблицю істинності для кожного логічного елемента (таблиця 9.3).

Таблиця 9.3 – Результати експериментальних досліджень логічних елементів

НІ		ВИКЛЮЧНЕ АБО			АБО			АБО - НІ			І			І - НІ		
X	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y
0		0	0		0	0		0	0		0	0		0	0	
1		1	0		1	0		1	0		1	0		1	0	
×	×	0	1		0	1		0	1		0	1		0	1	
×	×	1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	

3. Відповідно до таблиць істинності (таблиця 9.3) побудувати часові діаграми роботи логічних елементів.

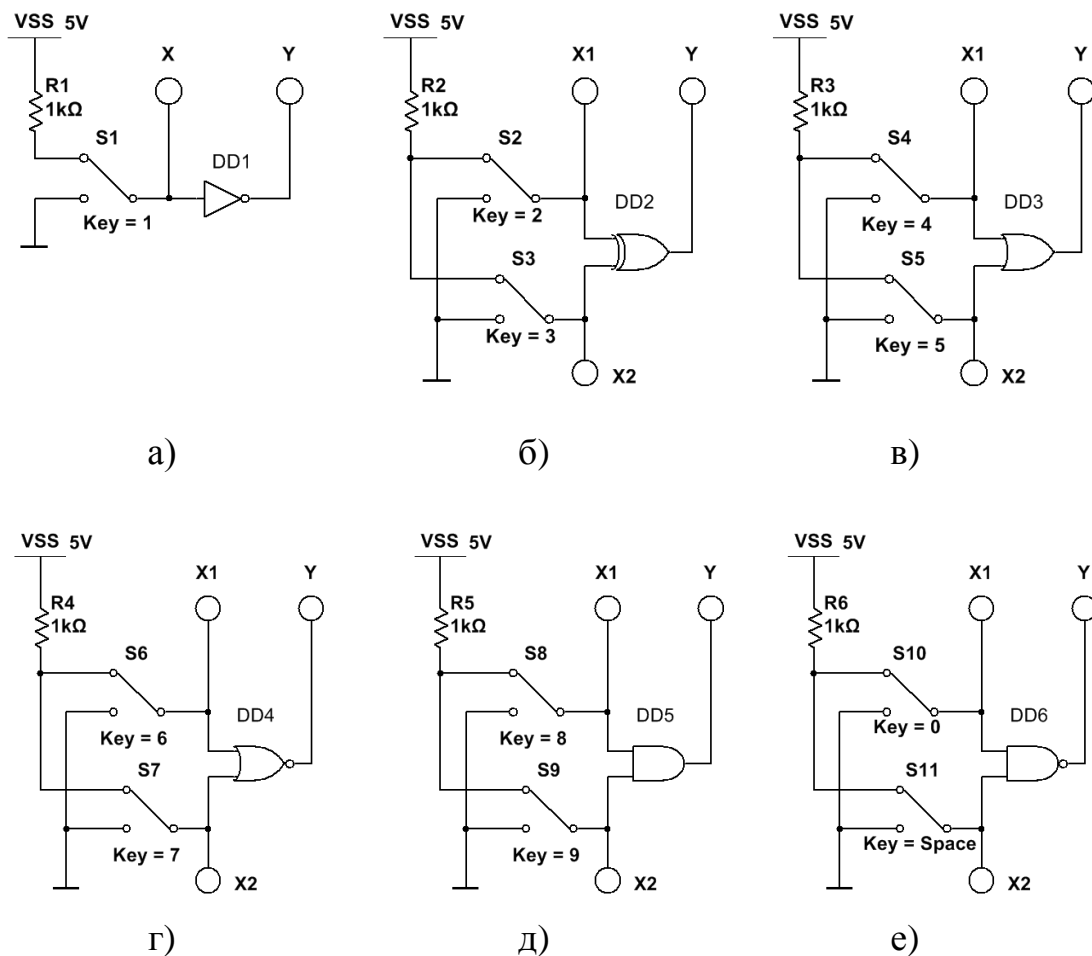
### 9.3.2 Дослідження тригерів

1. Набрати на робочому полі програми Multisim схеми для дослідження тригерів (рисунок 9.13).

2. Включити схему. Подаючи перемикачами  $S1, S2$  на входи тригерів сигнали у відповідності з таблицею 2.10 і, спостерігаючи рівні сигналів на прямому  $Q$  та інверсному  $Q'$  виходах тригерів, заповнити таблицю станів для кожного тригера (таблиця 9.4).

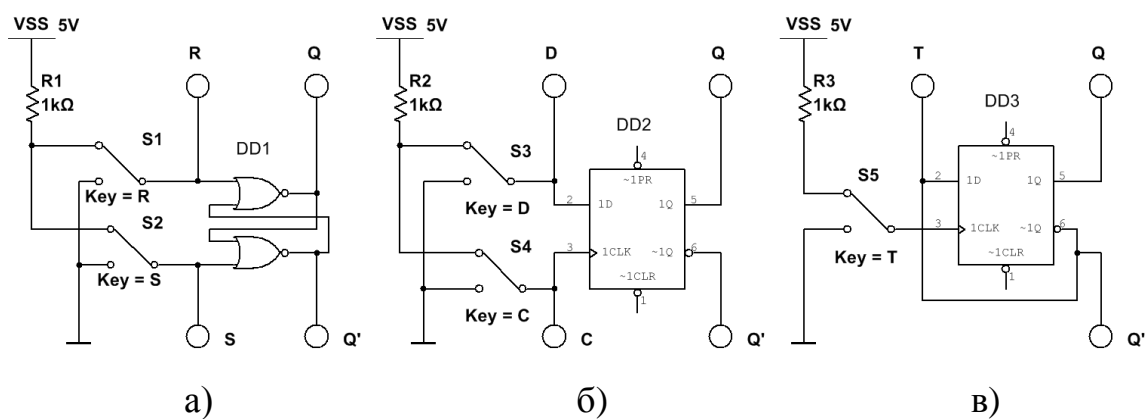
3. Відповідно до таблиць станів (таблиця 9.4) побудувати часові діаграми роботи тригерів.

**Примітка:** у схемі (рисунок 9.13, в) функції  $T$ -тригера виконує  $D$ -тригер.



а) НІ; б) Виключне АБО; в) АБО; г) АБО-НІ; д) І; е) І-НІ

Рисунок 9.12 – Схеми для дослідження логічних елементів



а) RS-тригер; б) D-тригер; в) T-тригер

Рисунок 9.13 – Схеми для дослідження тригерів

Таблиця 9.4 – Результати експериментальних досліджень тригерів

<i>RS</i> -тригер				<i>D</i> -тригер				<i>T</i> -тригер		
$t^{n+1}$		$Q^n$	$Q^{n+1}$	$t^{n+1}$		$Q^n$	$Q^{n+1}$	$t^{n+1}$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
R	S			D	C			T		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1			0	1			1		
0	0			1	0			0		
1	0			1	1			1		
0	0			0	0			0		
0	1			0	1			1		
0	0			0	0			0		

### Контрольні питання

1. Поясніть поняття логічних величин (логічний «0» та логічна «1»).
2. Назвіть основні логічні функції та елементи, які їх реалізують.
3. Поясніть призначення логічних елементів.
4. Наведіть основні параметри логічних елементів.
5. Наведіть умовне позначення, таблицю істинності та поясніть роботу логічних елементів: НІ, АБО, АБО-НІ, І, І-НІ, Виключне АБО.
6. Поясніть призначення тригерів.
7. Назвіть основні типи тригерів.
8. Поясніть функціональне призначення входів тригерів.
9. Поясніть різницю між асинхронним і синхронним тригерами.
10. Наведіть умовне позначення, таблицю переходів та поясніть роботу: *RS*-тригера, *D*-тригера, *T*-тригера, *JK*-тригера.

## 10 ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження імпульсних пристроїв на операційних підсилювачах: а) компаратора; б) тригера Шмітта; в) мультівібратора; г) одновібратора.

### 10.1 Загальні теоретичні відомості

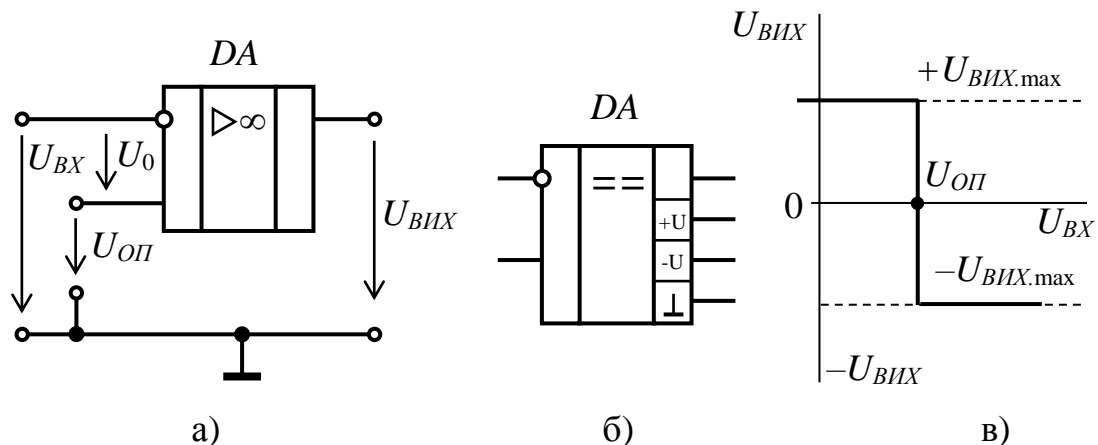
**Компаратор** – це пристрій, який призначений для порівняння двох напруг, що поступають на його входи. Компаратор здійснює по-

рівняння вимірюваної вхідної напруги ( $U_{BX}$ ) з опорною напругою ( $U_{OP}$ ). Як правило компаратор виконується на базі спеціалізованого операційного підсилювача (ОП).

Опорною напругою є незмінна за величиною напруга позитивної або негативної полярності, в той час коли вхідна напруга може змінюватися в часі. При досягненні вхідною напругою рівня опорної відбувається зміна полярності вихідної напруги компаратора, наприклад з  $+U_{ВИХ.max}$  на  $-U_{ВИХ.min}$ .

Різниця напруг  $U_{BX} - U_{OP}$  є вхідною напругою  $U_0$  компаратора, яка визначає його передатну характеристику (рисунк 10.1, б). При  $U_{BX} < U_{OP}$  напруга  $U_0 < 0$ , у зв'язку з чим  $U_{ВИХ} = +U_{ВИХ.max}$ . При  $U_{BX} > U_{OP}$  напруга  $U_0 > 0$  та  $U_{ВИХ} = -U_{ВИХ.min}$ .

Зміна полярності вихідної напруги відбувається під час переходу вхідної вимірюваної напруги через значення  $U_{OP}$ .

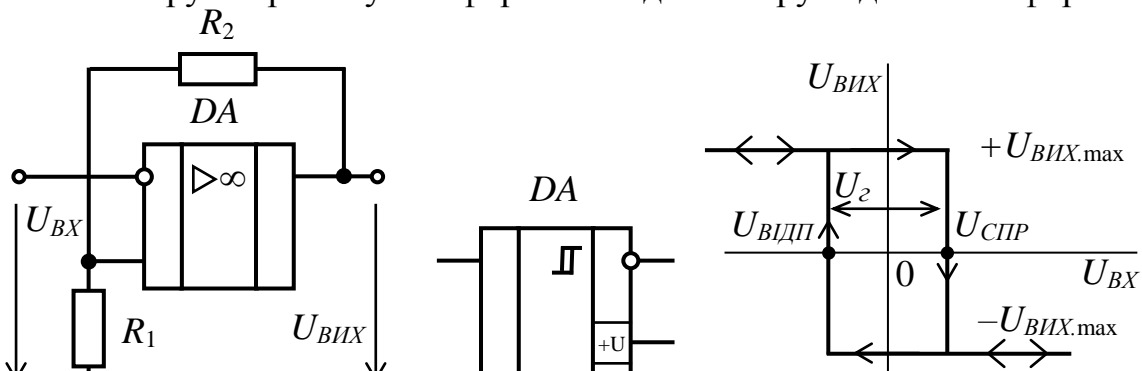


а – схема компаратора на операційному підсилювачі; б – передатна характеристика; в – умовне позначення

Рисунок 10.1 – Компаратор

Широке застосування отримав також компаратор, в якому ОП охоплений додатним зворотним зв'язком, який здійснюється по неінвертуючому входу за допомогою резисторів  $R_1$  та  $R_2$  (рисунк 10.2, а). Такий компаратор має передатну характеристику з гістерезисом. Схема відома під назвою тригера Шмітта.

**Тригер Шмітта** – це пристрій, який призначений для формування напруги прямокутної форми з вхідної напруги довільної форми.



а – схема; б – умовне позначення; в – передатна характеристика,

Рисунок 10.2 – Інвертуючий тригер Шмітта

Тригер Шмітта є пороговим елементом, рівні вмикання і вимикання якого не співпадають. Різниця в рівнях називається гістерезисом перемикавання.

Перемикання схеми в стан  $-U_{ВИХ.min}$  відбувається при досягненні вхідною напругою  $U_{ВХ}$  напруги (порогу) спрацювання  $U_{СПР}$ , а повернення в початковий стан  $U_{ВИХ} = +U_{ВИХ.max}$  – при зниженні  $U_{ВХ}$  до напруги порогу відпускання  $U_{ВІДП}$ .

Значення порогової напруги:

$$U_{СПР} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+U_{ВИХ.max}); \quad (10.1)$$

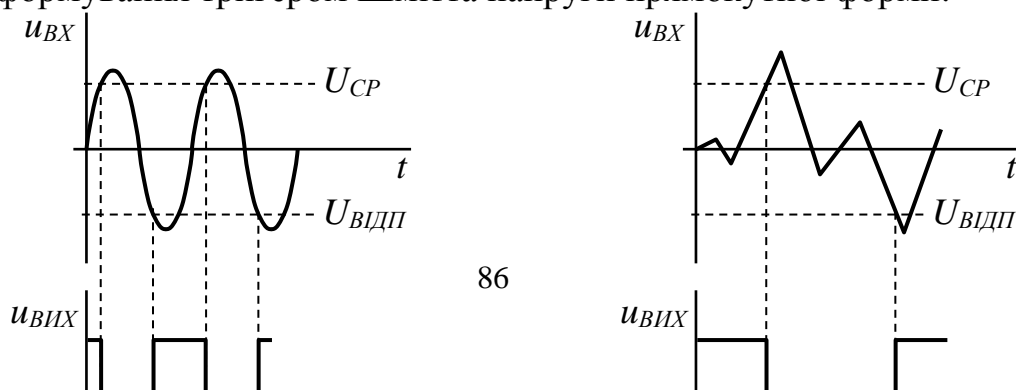
$$U_{ВІДП} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-U_{ВИХ.max}), \quad (10.2)$$

звідки ширина зони гістерезису

$$U_{Г} = U_{СПР} - U_{ВІДП}. \quad (10.3)$$

Компаратори знайшли застосування в системах автоматичного керування та у вимірювальній техніці, а також під час конструювання різних вузлів імпульсної та цифрової техніки (зокрема, аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів).

На рисунку 10.3 наведені часові діаграми, що пояснюють принцип формування тригером Шмітта напруги прямокутної форми.



а) з синусоїдальної напруги; б) з довільної напруги  $u_{BX} = f(t)$

Рисунок 10.3 – Часові діаграми, що пояснюють принцип формування тригером Шмітта напруги прямокутної форми

**Мультивібратор** – це пристрій, який призначений для генерування періодичної послідовності імпульсів напруги прямокутної форми з необхідними параметрами (амплітудою, тривалістю, частотою надходження та ін.).

Подібно до генераторів синусоїдальних коливань, мультивібратори працюють в режимі самозбудження: для формування імпульсного сигналу в мультивібраторах не потрібна зовнішня дія, наприклад подача вхідних сигналів. Процес отримання імпульсної напруги ґрунтується на перетворенні енергії джерела постійного струму.

Мультивібратори можуть працювати в одному з трьох режимів: 1) очікування; 2) автоколивань; 3) синхронізації.

Мультивібратор, що працює в режимі очікування, називають **одновібратором**.

На рисунку 10.4 наведена схема і часові діаграми роботи симетричного мультивібратора на ОП. Мультивібратор виконаний на основі інвертуючого тригера Шмітта, в якому від'ємний зворотний зв'язок здійснюється через  $RC$ -коло, а додатний через дільник напруги  $R_1R_2$ . Автоколивальний режим роботи створюється завдяки підключенню до інвертуючого входу ОП часозадавального  $RC$  кола.

Частота надходження імпульсів симетричного мультивібратора

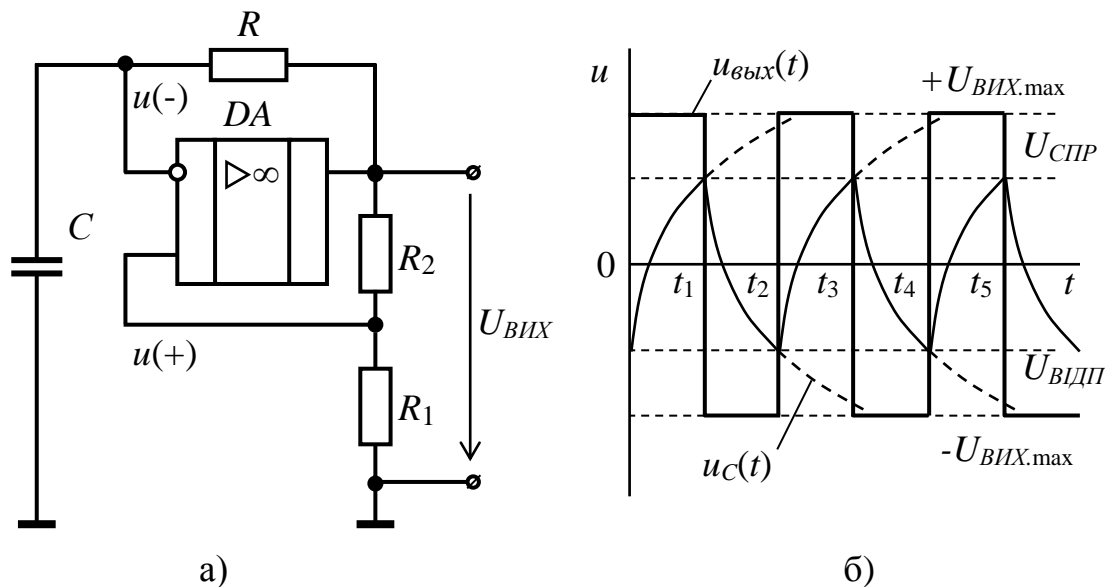
$$f = 1/T = 1/(t_{i1} + t_{i2}) = 1/2 t_i. \quad (10.4)$$

Тривалість імпульсу мультивібратора

$$t_i = RC \ln [1 + (2R_1/R_2)], \quad (10.5)$$

а період

$$T = 2t_i. \quad (10.6)$$



а – схема; б – часові діаграми роботи

Рисунок 10.4 – Симетричний мультивібратор

**Одновібратор (очікуючий мультивібратор)** – це пристрій, який призначений для формування імпульсу напруги прямокутної форми з необхідною тривалістю і амплітудою під час надходження до входу запускаючого імпульсу.

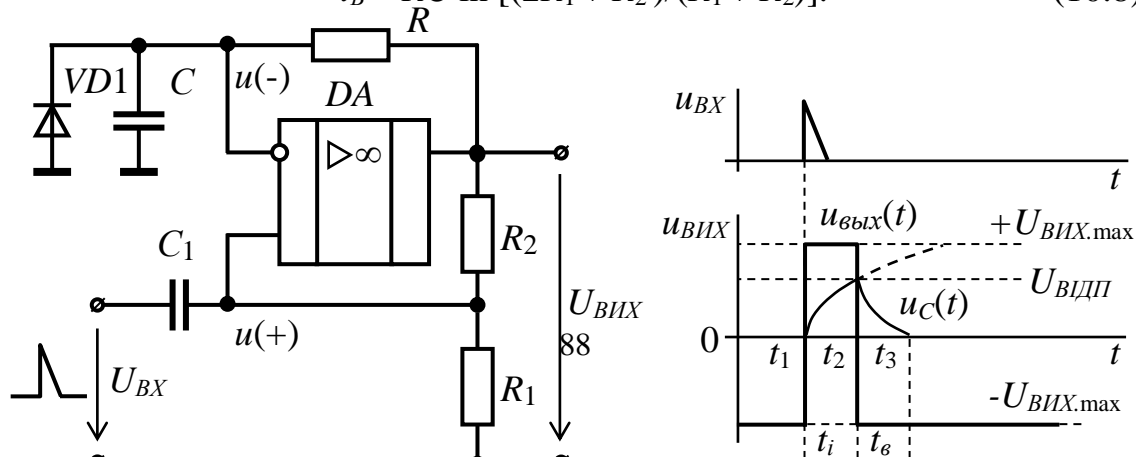
На рисунку 10.5 наведена схема одновібратора на ОП і часові діаграми його роботи. Її основою служить схема мультивібратора (рисунку 10.4), в якій для створення роботи в режимі очікування паралельно конденсатору  $C$  увімкнений діод  $VD1$ . При показаному на рисунку 10.5 напрямі увімкнення діода  $VD1$  схема запускається вхідним імпульсом напруги позитивної полярності.

Тривалість імпульсу, що формується одновібратором:

$$t_i = RC \ln(1 + R_1/R_2). \quad (10.7)$$

Час відновлення одновібратора:

$$t_B = RC \ln [(2R_1 + R_2)/(R_1 + R_2)]. \quad (10.8)$$





а – схема; б – часові діаграми роботи

Рисунок 10.5 – Одновібратор

## 10.2 Завдання для самостійної підготовки

### 10.2.1 Для компаратора

1. Привести визначення компаратора (описати функціональне призначення компаратора).
2. Привести схему компаратора.
3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи компаратора.
4. Побудувати графік залежності  $U_{ВИХ} = f(U_{ВХ})$ . Опорна напруга  $U_{ОП}$  подана на неінвертуючий вхід операційного підсилювача, а вхідна синусоїдальна напруга подана на інвертуючий вхід (див. рисунок 10.6). Значення напруг наведені в таблиці 10.1.
5. Представити графіки зміни в часі вихідної напруги компаратора  $u_{ВИХ} = f(t)$  і вхідної синусоїдальної напруги  $u_{ВХ} = f(t)$ .

### 10.2.2 Для тригера Шмітта

1. Привести визначення тригера Шмітта.
2. Привести схему тригера Шмітта.
3. Описати призначення резисторів  $R1$  і  $R2$  дільника напруги і принцип роботи тригера Шмітта.
4. Визначити значення граничних напруг  $U_{СПР}$  і  $U_{ВДП}$  тригера Шмітта при  $U_{ОП} = 0$  і  $U_{ОП} > 0$ . Значення опорної напруги наведені в таблиці 10.2.
5. Побудувати графік залежності  $U_{ВИХ} = f(U_{ВХ})$ .
6. Представити графік зміни в часі вихідної напруги тригера  $u_{ВИХ} = f(t)$  і вхідної синусоїдальної напруги  $u_{ВХ} = f(t)$ .

Таблиця 10.1 – Вихідні дані до п.п. 10.2.1

$$U_{ВНХ\max} = 11 \text{ В}$$

№ вар.	$U_{оп},$ В	$U_{m\text{ ВХ}},$ В	№ вар.	$U_{оп},$ В	$U_{m\text{ ВХ}},$ В	№ вар.	$U_{оп},$ В	$U_{m\text{ ВХ}},$ В
1	2,0	9,0	11	4,0	7,0	21	3,5	7,6
2	2,2	8,8	12	4,1	6,8	22	3,7	7,4
3	2,4	8,6	13	4,2	6,6	23	3,9	7,2
4	2,6	8,4	14	2,1	9,0	24	4,1	7,0
5	2,8	8,2	15	2,3	8,8	25	4,3	6,8
6	3,0	8,0	16	2,5	8,6	26	4,5	6,6
7	3,2	7,8	17	2,7	8,4	27	2,0	9,0
8	3,4	7,6	18	2,9	8,2	28	2,2	8,8
9	3,6	7,4	19	3,1	8,0	29	2,4	8,6
10	3,8	7,2	20	3,3	7,8	30	2,6	8,4

Таблиця 10.2 – Вихідні дані до п.п. 10.2.2

$$U_{ВНХ\max} = 11 \text{ В}$$

№ вар.	$U_{оп},$ В	$U_{m\text{ ВХ}},$ В	№ вар.	$U_{оп},$ В	$U_{m\text{ ВХ}},$ В	№ вар.	$U_{оп},$ В	$U_{m\text{ ВХ}},$ В
1	1,8	4,8	11	3,8	6,8	21	3,4	6,6
2	2,0	5,0	12	4,0	7,0	22	3,6	6,8
3	2,2	5,2	13	4,2	7,2	23	3,8	7,0
4	2,4	5,4	14	2,0	5,2	24	4,0	7,2
5	2,6	5,6	15	2,2	5,4	25	4,2	7,4
6	2,8	5,8	16	2,4	5,6	26	3,4	6,8
7	3,0	6,0	17	2,6	5,8	27	3,6	7,2
8	3,2	6,2	18	2,8	6,0	28	3,8	7,4
9	3,4	6,4	19	3,0	6,2	28	4,0	7,6
10	3,6	6,6	20	3,2	6,4	30	4,2	7,8

### 10.2.3 Для мультівібратора

1. Привести визначення мультівібратора.
2. Привести схему мультівібратора.
3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи мультівібратора.

4. Розрахувати частоту  $f$  (див. вираз 10.4) і тривалість  $t_i$  (див. вираз 10.5) імпульсів мультивібратора. Варіанти завдань наведені в таблиці 10.3.

Таблиця 10.3 – Вихідні дані до п.п. 10.2.3

№ вар.	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R$ , кОм	$C$ , мкФ	$R'$ , кОм	№ вар.	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R$ , кОм	$C$ , мкФ	$R'$ , кОм
1	1	3	10	20	8	16	1,2	3,4	30	18	28
2	1,1	3,2	20	19	18	17	1,3	3,6	40	17	35
3	1,2	3,4	30	18	28	18	1,4	3,8	50	16	45
4	1,3	3,6	40	17	35	19	4,5	4,0	60	15	55
5	1,4	3,8	50	16	45	20	4,6	4,1	70	14	65
6	4,5	4,0	60	15	55	21	1,7	4,2	80	13	75
7	4,6	4,1	70	14	65	22	1,8	4,3	90	12	85
8	1,7	4,2	80	13	75	23	1,9	4,5	100	11	95
9	1,8	4,3	90	12	85	24	2,0	4,8	100	10	90
10	1,9	4,5	100	11	95	25	2,1	5,0	120	21	100
11	2,0	4,8	100	10	90	26	2,2	5,2	130	22	110
12	2,1	5,0	120	21	100	27	1,4	4,5	50	15	8
13	2,2	5,2	130	22	110	28	4,5	4,8	60	14	18
14	1	3	10	20	8	29	4,6	5,0	70	13	28
15	1,1	3,2	20	19	18	30	1,7	5,2	80	12	35

5. Представити на одному рисунку графіки зміни напруг у часі на інвертуючому вході  $u_C = f(t)$  і виході операційного підсилювача  $u_{ВИХ} = f(t)$ .

6. Привести схему несиметричного мультивібратора.

7. Представити для несиметричного мультивібратора графіки зміни напруг у часі на інвертуючому вході  $u_C = f(t)$  і виході операційного підсилювача  $u_{ВИХ} = f(t)$ .

8. Описати можливі способи зміни тривалості імпульсів, що генеруються мультивібратором.

#### 10.2.4 Для одновібратора

1. Привести визначення одновібратора.

2. Привести схему одновібратора.

3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи одновібратора.

4. Розрахувати тривалість імпульсу  $t_i$  (див. вираз 10.6) і час відновлення однобратора  $t_B$  (див. вираз 10.7). Варіанти завдань наведені в таблиці 10.4. Величини  $R_1$  і  $R_2$  наведені в таблиці 10.3.

5. Представити графіки зміни напруг у часі на інвертуючому  $u_C = f(t)$  і неінвертуючому  $u_{BX} = f(t)$  входах і виході  $u_{BIX} = f(t)$  операційного підсилювача.

6. Пояснить, які зміни потрібно виконати в схемі, щоб змінити полярність імпульсу, що генерується однобратором?

Таблиця 10.4 – Вихідні дані до п.п. 10.2.4

$U_{BIX} = 11\text{В}$ .

VD 1N4001, $U_{\text{пр}} = 1,35\text{В}$			VD 1N4148, $U_{\text{пр}} = 1,57\text{В}$		
№ вар.	R, кОм	C <sub>1</sub> , мкФ	№ вар.	R, кОм	C <sub>1</sub> , мкФ
1	20	100	16	80	55
2	24	97	17	84	52
3	28	94	18	88	49
4	32	91	19	90	46
5	36	88	20	92	43
6	40	85	21	94	40
7	44	82	22	96	37
8	48	79	23	98	34
9	52	76	24	100	31
10	56	73	25	16	100
11	60	70	26	12	95
12	64	67	27	36	88
13	68	64	28	40	85
14	72	61	29	44	82
15	76	58	30	48	79

### 10.3 Порядок виконання роботи

#### 10.3.1 Дослідження компаратора

1. Запустити програму Multisim і набрати схему для дослідження компаратора (рисунок 10.6).

2. Установити величину заданої опорної напруги  $U_{\text{оп}}$  згідно таблиці 10.1.

3. На віртуальному генераторі встановити задані значення напруги  $U_{m\text{BX}}$  (синусоїдальної форми) і частоти вхідного сигналу.

4. Лінію, що з'єднує вихід операційного підсилювача (компаратора) і вхід "В" віртуального осцилографа встановити кольоровою.

5. Привести осцилограми вхідної  $u_{BX} = f(t)$  і вихідної  $u_{BHX} = f(t)$  напруги компаратора (див. рисунок 10.7).

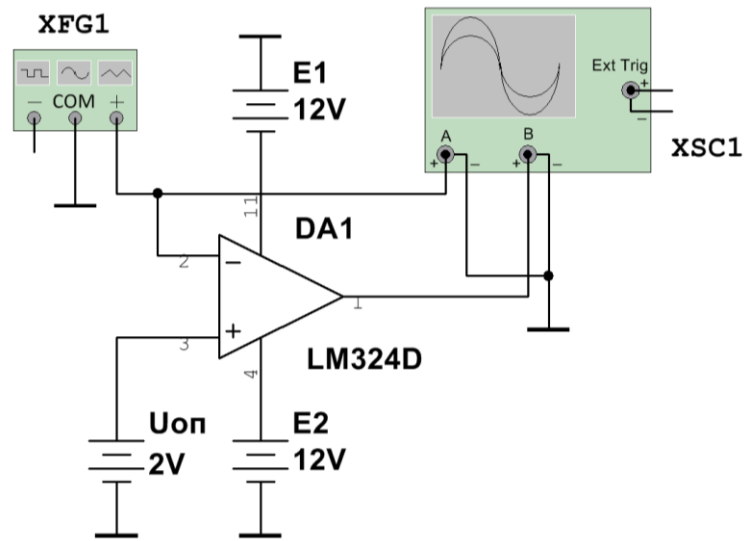


Рисунок 10.6 – Схема для дослідження компаратора

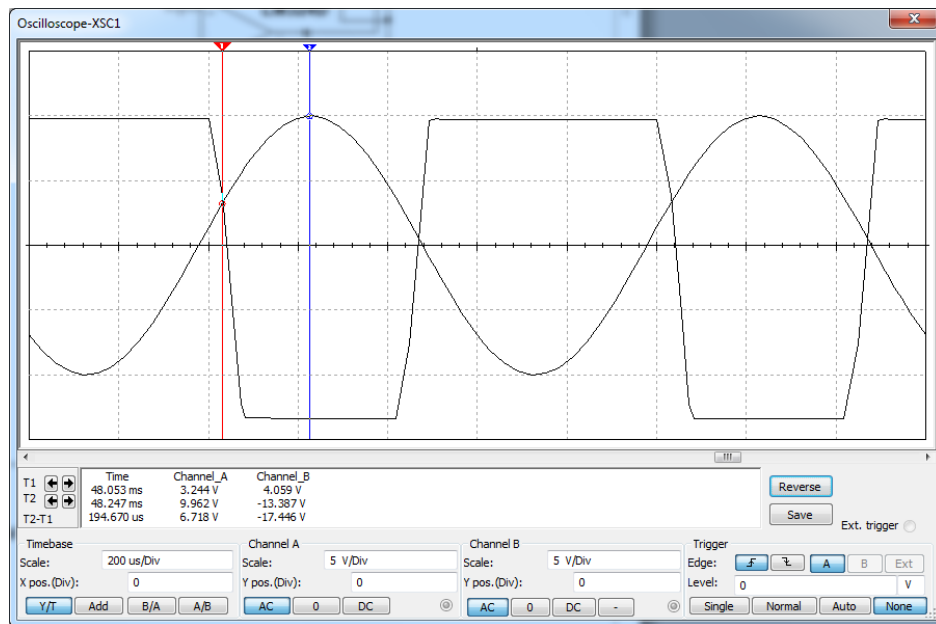


Рисунок 10.7 – Осцилограми напруг компаратора

### 10.3.2 Дослідження тригера Шмітта

1. На робочому полі програми набрати схему для дослідження тригера Шмітта (рисунок 10.8).

2. Установити величину вхідної напруги  $U_{m\ BX}$  відповідно до варіанта завдання з таблиці 10.2 і величину опорної напруги  $U_{оп} = 0$ .

3. Привести осцилограми вхідної  $u_{BX} = f(t)$  і вихідної  $u_{ВИХ} = f(t)$  напруги тригера Шмітта (див. рисунок 10.9).
4. Установити величину вхідної  $U_{m\ BX}$  і опорної напруги  $U_{ОН} > 0$  відповідно до варіанта завдання з таблиці 10.2.
5. Привести осцилограми вхідної  $u_{BX} = f(t)$  і вихідної  $u_{ВИХ} = f(t)$  напруги тригера Шмітта (див. рисунок 10.10).

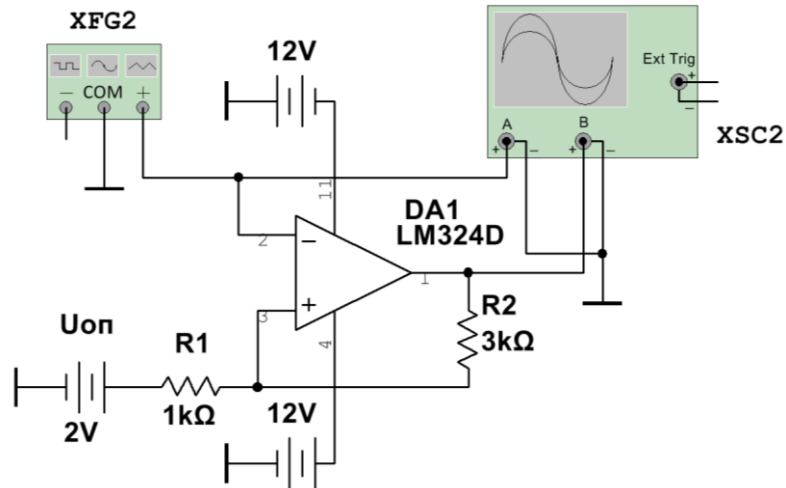


Рисунок 10.8 – Схема для дослідження тригера Шмітта

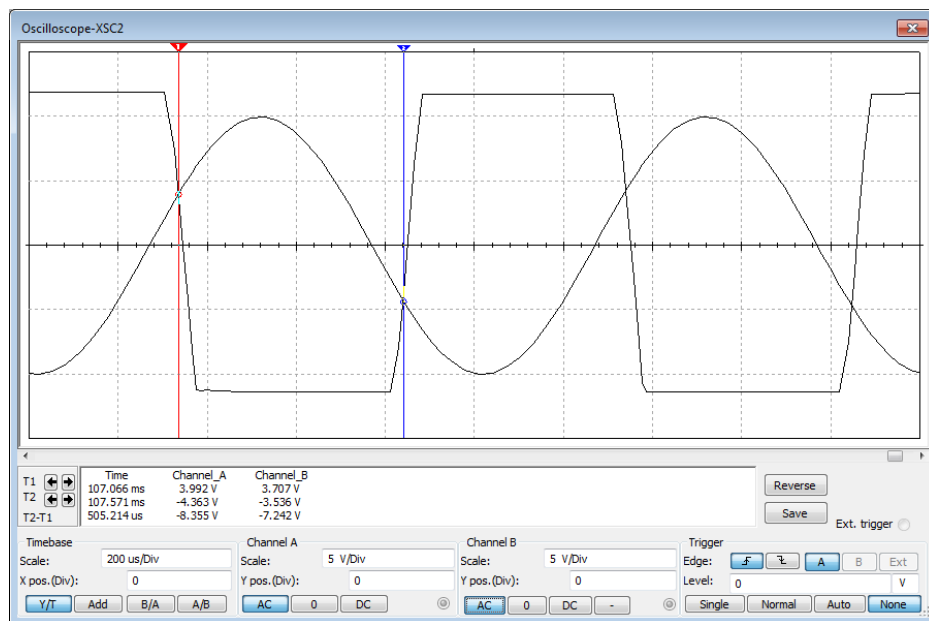


Рисунок 10.9 – Осцилограми напруг тригера Шмітта при  $U_{ОН} = 0$

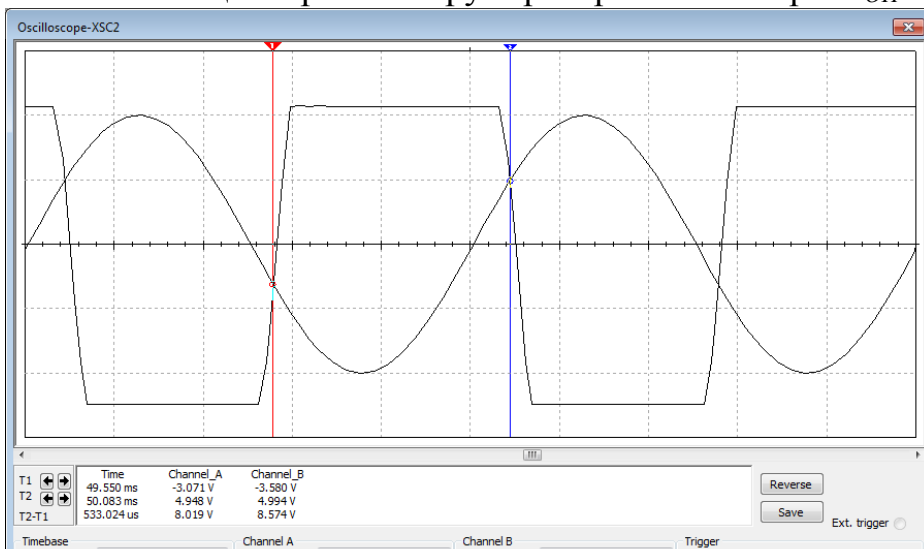


Рисунок 10.10 – Осцилограми напруг тригера Шмітта при  $U_{оп} > 0$

### 10.3.3 Дослідження мультивібратора

1. Запустити програму Multisim і набрати схему для дослідження мультивібратора (рисунок 10.11).
2. Установити задані значення елементів схеми. Варіанти завдань наведені в таблиці 10.3.

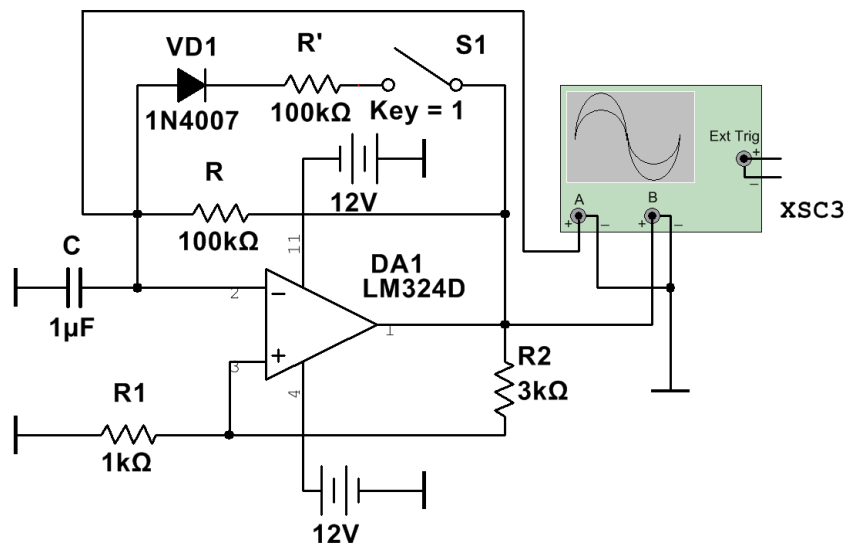


Рисунок 10.11 – Схема для дослідження мультивібратора

3. Лінію, що з'єднує вихід операційного підсилювача (мультивібратора) і вхід "В" віртуального осцилографа встановити кольоровою.
4. Привести осцилограми вхідної  $u_{BX} = f(t)$  і вихідної  $u_{ВНХ} = f(t)$  напруги мультивібратора (див. рисунок 10.12).

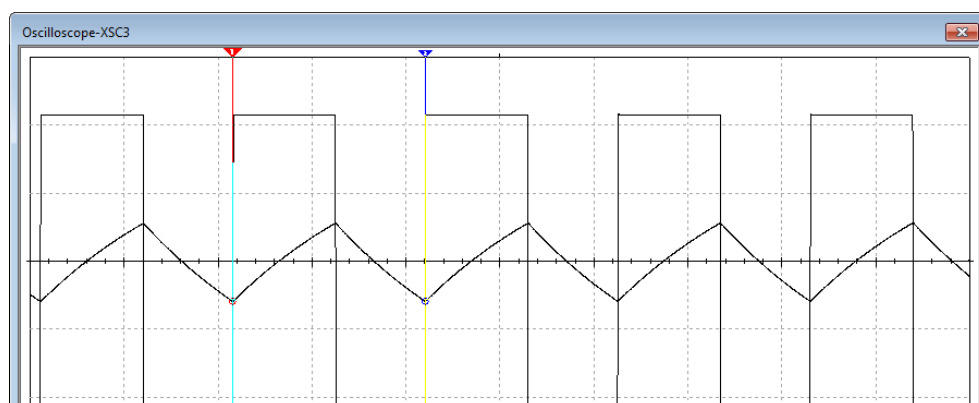


Рисунок 10.12 – Осцилограми напруг симетричного мультивібратора

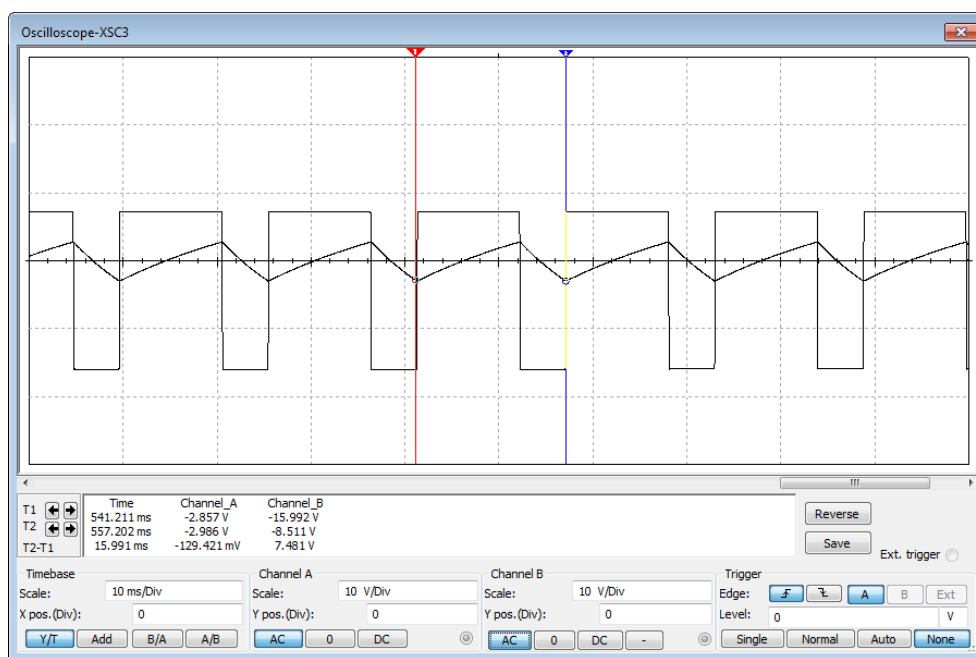


Рисунок 10.13 – Осцилограми напруг несиметричного мультивібратора

5. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити тривалість і період імпульсів, що генеруються мультивібратором.

6. Перемикачем  $S1$  підключити додаткове електричне коло, що складається з діода  $VD$  і резистора  $R'$ . Установити задане значення опору резистора  $R'$  згідно таблиці 10.3.

7. Виконати пункти 3 – 5.



### 10.3.4 Дослідження одновібратора

1. На робочому полі програми набрати схему для дослідження одновібратора (рисунок 10.14).

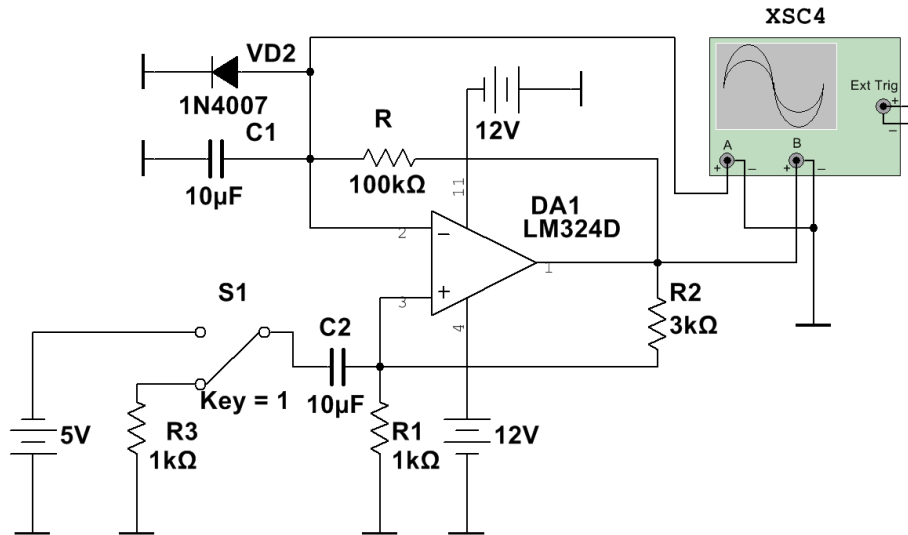


Рисунок 10.14 – Схема для дослідження одновібратора

2. Установити задані значення елементів схеми. Варіанти завдань наведені в таблиці 10.4.

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Перемикачем S1 підключити джерело входного сигналу до входу операційного підсилювача.

5. Привести осцилограми напруг на входах операційного підсилювача  $u_{BX} = f(t)$ ,  $u_C = f(t)$  і вихідної напруги  $u_{ВИХ} = f(t)$  одновібратора (див. рисунок 10.15).

6. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити тривалість імпульсу, що генеруються одновібратором і час відновлення одновібратора.

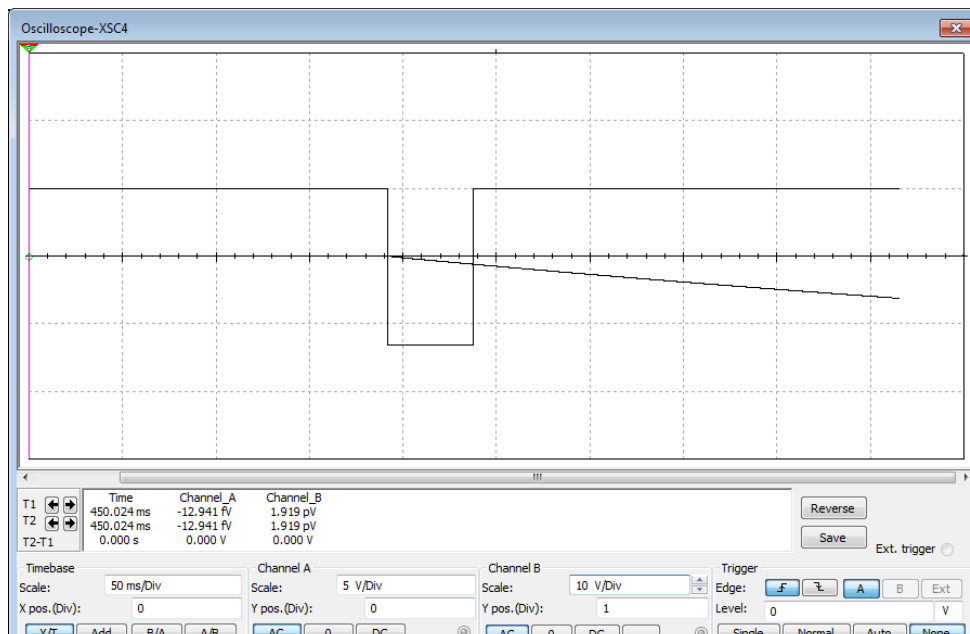


Рисунок 10.15 – Осцилограми напруг одновібратора

### Контрольні питання

1. Наведіть визначення електричного імпульсу. Наведіть форми імпульсних сигналів.
2. Наведіть параметри імпульсів та їх послідовностей.
3. Поясніть призначення компараторів.
4. Наведіть умовне графічне позначення та передатну характеристику компаратора.
5. Наведіть схему компаратора на операційному підсилювачі (ОП) та поясніть принцип її роботи.
6. Поясніть призначення тригера Шмітта.
7. Наведіть умовне графічне позначення та передатну характеристику тригера Шмітта.
8. Наведіть схему тригера Шмітта на ОП та поясніть принцип її роботи.
9. Поясніть призначення мультивібраторів.
10. Назвіть режими роботи мультивібраторів.
11. Наведіть схему симетричного мультивібратора на ОП. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
12. Наведіть схему несиметричного мультивібратора на ОП. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
13. Поясніть, яка відмінність між симетричним і несиметричним мультивібраторами?
14. Поясніть, чим визначається тривалість імпульсів мультивібратора? Як визначити частоту імпульсів мультивібратора?
15. Поясніть призначення одновібраторів.
16. Наведіть схему одновібратора на ОП. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
17. Назвіть основні параметри мультивібраторів, одновібраторів.

18. Поясніть, як зміняться параметри імпульсної напруги симетричного мультивібратора на базі ОП при збільшенні опору резистора в колі від'ємного зворотного зв'язку; зменшенні ємності конденсатора?
19. Поясніть, як зміняться параметри імпульсної напруги одновібратора на базі ОП при збільшенні опору резистора в колі від'ємного зворотного зв'язку; збільшенні ємності конденсатора часозадавального кола; зміні напрямку включення діода?

## 11 ГЕНЕРАТОРИ ЛІНІЙНО ЗМІНЮВАНОЇ (ПИЛКОПОДІБНОЇ) НАПРУГИ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження генераторів лінійно змінюваної (пилкоподібної) напруги.

### 11.1 Загальні теоретичні відомості

**Лінійно змінюваною (пилкоподібною) напругою (ЛЗН)** називають імпульсну напругу, яка впродовж деякого часу змінюється практично за лінійним законом, а потім повертається до вихідного рівня (рисунок 11.1).

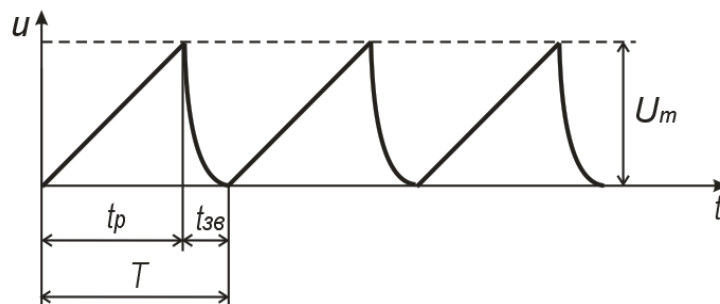


Рисунок 11.1 – Часові діаграми лінійно змінюваної напруги

Лінійно змінювана напруга характеризується наступними основними параметрами: періодом  $T$ , тривалістю робочого ходу  $t_p$ , тривалістю зворотного ходу  $t_{zv}$ , амплітудою  $U_m$ , коефіцієнтом нелінійності  $\varepsilon$ .

Формування лінійно змінюваної напруги засновано на чергуванні в часі процесів зарядження і розрядження конденсатора.

Схема транзисторного генератора пилкоподібної напруги (ГПН) зображена на рисунку 11.2.

Схема працює наступним чином. За позитивної напівхвилі напруги  $u_2$  транзистор  $VT$  відкритий, конденсатор  $C$  розряджений, вихідна напруга  $u_L = 0$ .

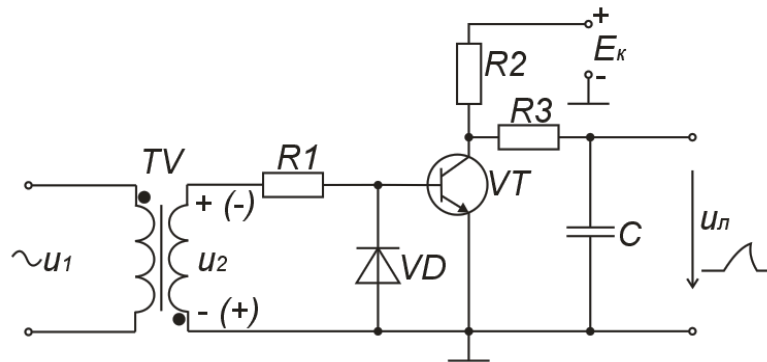


Рисунок 11.2 – Транзисторний генератор пилкоподібної напруги

За негативної напівхвилі напруги  $u_2$  транзистор закривається, а конденсатор заряджається по колу  $(+E_K, R2, R3, C, -E_K)$ .

За наступної позитивної напівхвилі напруги  $u_2$ , транзистор знову відкривається і конденсатор швидко розряджається до нуля через резистор  $R3$ , що обмежує струм через транзистор.

У сучасних пристроях частіше застосовують генератори лінійно змінюваної напруги, які побудовані на основі інтегратора, виконаного на операційному підсилювачі (ОП) і доповненого розрядним транзисторним ключем (рисунок 11.3). Інтегратор складається з елементів  $R2, C, DA2$ . Розрядний транзистор  $VT$  емітером підключений до інвертуючого входу операційного підсилювача  $DA2$ , що має нульовий потенціал. Синхронізує роботу генератора з напругою мережі нуль-орган на операційному підсилювачі  $DA1$ .

## 11.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення генератора лінійно змінюваної (пилкоподібної) напруги (ГЛЗН).

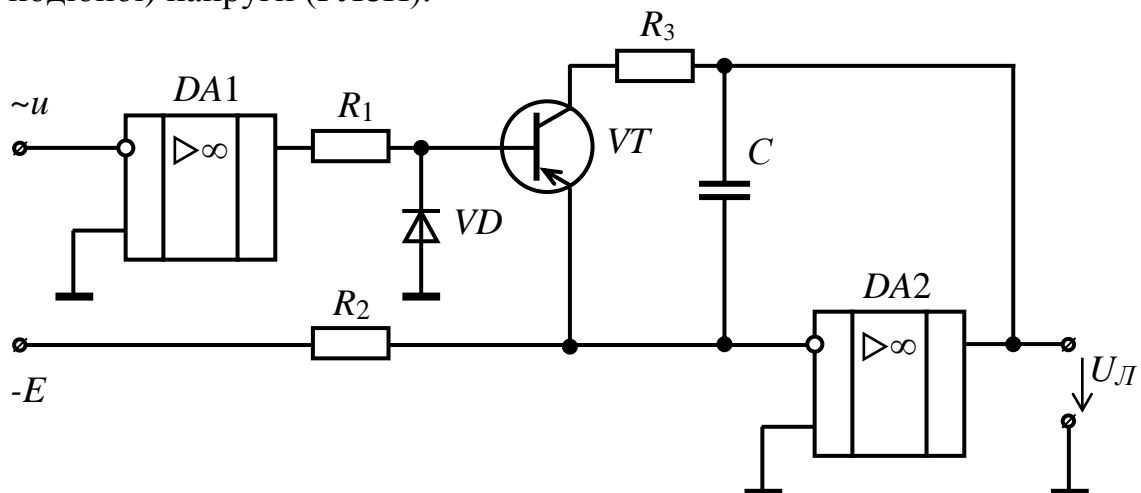


Рисунок 11.3 – Генератор пилоподібної напруги на операційному підсилювачі

2. Привести часову діаграму імпульсного сигналу пилоподібної форми  $u = f(t)$ . Вказати на ній основні параметри лінійно змінюваної напруги.
3. Привести схему ГЛЗН на біполярному транзисторі. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи генератора.
4. Привести схему ГЛЗН на операційному підсилювачі. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи генератора.

### 11.3 Порядок виконання самостійної роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження ГЛЗН на біполярному транзисторі (рисунок 11.4).
2. Установити задані параметри елементів схеми.
3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.
4. Включити схему. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруг на виході генератора лінійно змінюваної напруги  $u_{вих} = f(t)$  і імпульсів, які формуються генератором  $G$   $u_{СК} = f(t)$  (див. рисунок 11.5).
5. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити параметри лінійно змінюваної напруги: амплітуду  $U_m$ , тривалість робочого (прямого) ходу  $t_P$ , тривалість зворотного ходу  $t_{ЗВ}$  і період повторення імпульсів  $T$ .

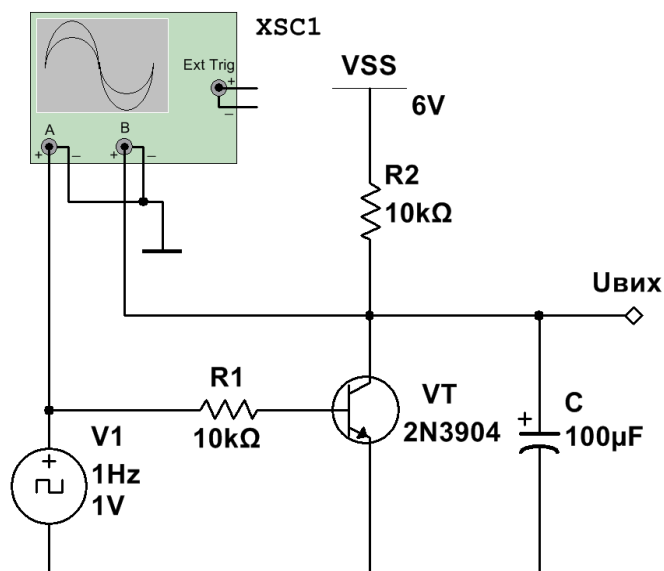


Рисунок 11.4 – Схема для дослідження генератора лінійно змінюваної напруги на біполярному транзисторі

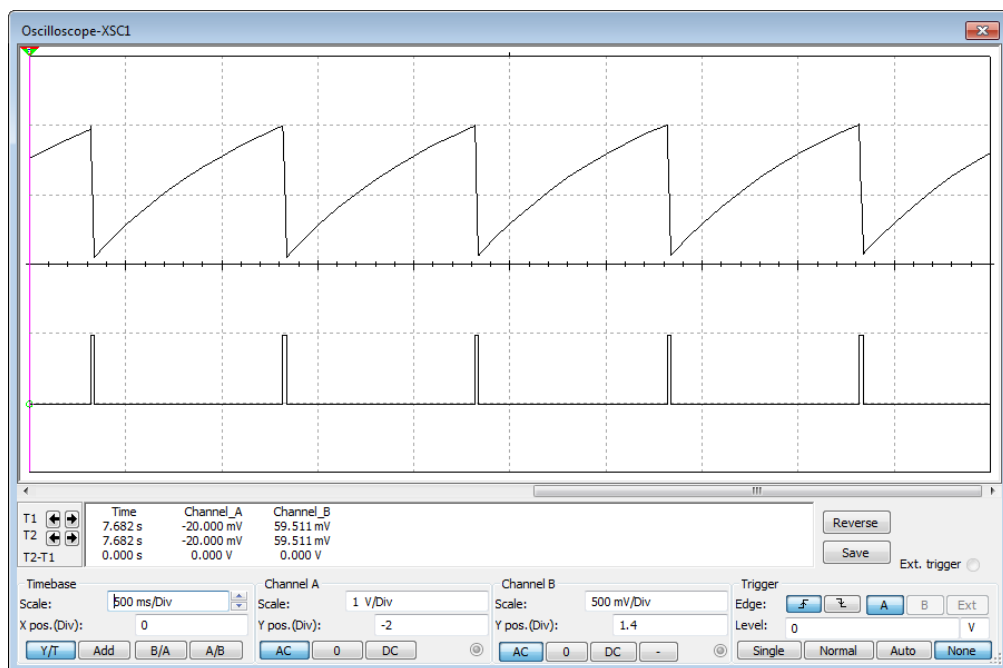


Рисунок 11.5 – Осцилограми напруг генератора лінійно змінюваної напруги на біполярному транзисторі

6. Провести додаткові дослідження залежності параметрів і форми вихідних імпульсів генератора (рисунок 11.4) від величини опору резистора  $R2$  ( $R2 = 2R2$ ;  $R2 = R2/2$ ) і ємності конденсатора  $C$  ( $C = 2C$ ;  $C = C/2$ ). Провести аналіз отриманих результатів.
7. Набрати схему для дослідження ГЛЗН на ОП (рисунок 11.6).
8. Установити задані параметри елементів схеми.
9. Включити схему. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруг на виході генератора  $u_{ВНХ} = f(t)$  (див. рисунок 11.7).

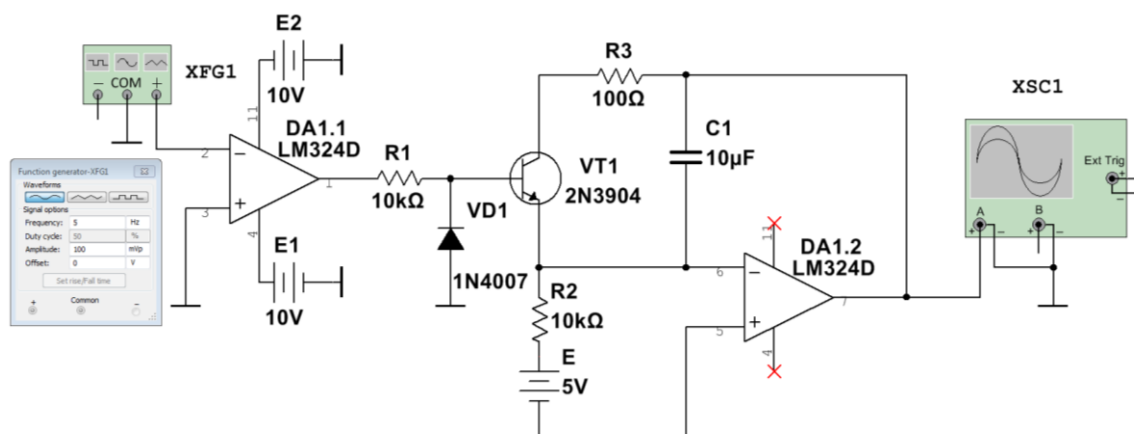


Рисунок 11.6 – Схема для дослідження генератора лінійно змінюваної напруги на операційному підсилювачі

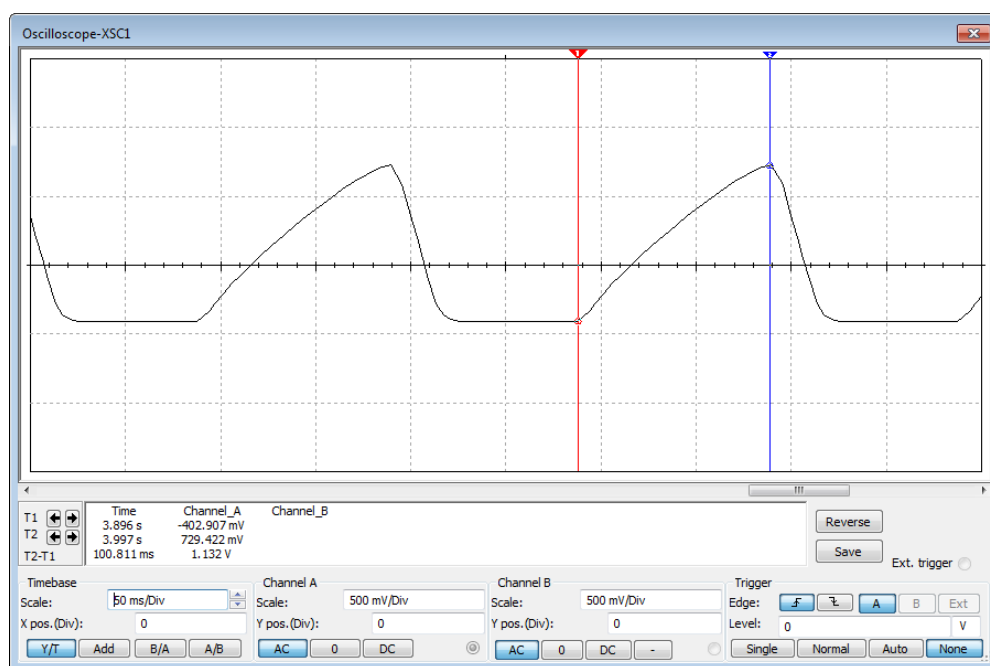


Рисунок 11.7 – Осцилограми напруг генератора лінійно змінюваної напруги на операційному підсилювачі

10. За допомогою віртуального осцилографа визначити параметри лінійно змінюваної напруги: амплітуду  $U_m$ , тривалість робочого (прямого) ходу  $t_P$ , тривалість зворотного ходу  $t_{ЗВ}$  і період повторення імпульсів  $T$ .

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення генераторів лінійно змінюваної напруги.
2. Наведіть форму імпульсного сигналу пилкоподібної форми. Назвіть основні параметри лінійно змінюваної напруги

3. Наведіть схему генератора лінійно змінюваної напруги на біполярному транзисторі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.

4. Наведіть схему генератора лінійно змінюваної напруги на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.

5. Поясніть, якими параметрами генератора лінійно змінюваної напруги визначається частота імпульсного сигналу на виході генератора?

6. Поясніть, за допомогою яких параметрів регулюють нахил імпульсів пилкоподібної форми генераторів лінійно змінюваної напруги.

## 12 ВИПРЯМЛЯЧІ ОДНОФАЗНОГО СТРУМУ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження схем однофазних випрямлячів. Дослідження впливу ємності конденсатора згладжувального фільтра на форму і величину випрямленої напруги.

### 12.1 Загальні теоретичні відомості

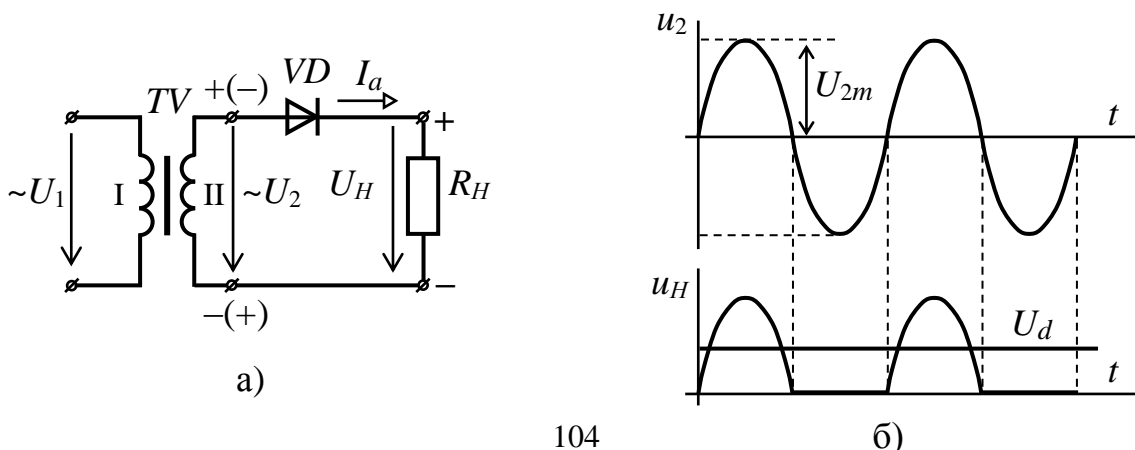
**Випрямляч** – це пристрій, який призначений для перетворення енергії джерела змінного струму в постійний струм.

Випрямлячі підрозділяють на некеровані та керовані. За допомогою некерованих випрямлячів отримують випрямлену напругу незмінної величини. При необхідності змінювати (регулювати) величину випрямленої напруги або струму застосовують керовані випрямлячі.

За числом фаз випрямленої напруги змінного струму випрямлячі підрозділяють на однофазні, трифазні та багатофазні.

За величиною потужності випрямлячі підрозділяють на випрямлячі малої, середньої та великої потужності.

На рисунку 12.1 приводиться принципова схема однофазного однонапівперіодного випрямляча. Випрямляч складається з трансформатора  $TV$ , до вторинної обмотки якого послідовно приєднані діод  $VD$  та навантаження  $R_H$ .





а – схема; б – часові діаграми напруги

Рисунок 12.1 – Однофазний однонапівперіодний випрямляч

Основні параметри схеми однонапівперіодного випрямляча:

$$U_{HCEP} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,45 U_2 \quad (12.1)$$

або

$$U_2 = \frac{\pi U_{HCEP}}{\sqrt{2}} \approx 2,22 U_{HCEP}. \quad (12.2)$$

Струм вторинної обмотки трансформатора:

$$I_{HCEP} = 0,45 \frac{U_2}{R_H}; \quad (12.3)$$

$$I_2 \approx 1,57 I_{HCEP}. \quad (12.4)$$

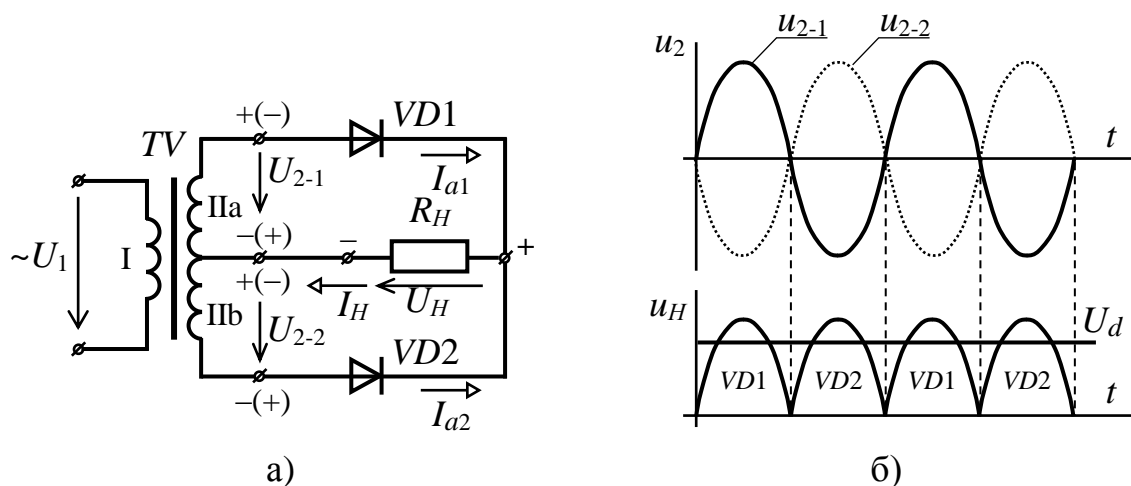
Коефіцієнт пульсації

$$K_{\Pi} \approx 1,57. \quad (12.5)$$

Зворотна напруга, що прикладається до закритого діода під час зворотного напівперіоду

$$U_{зв\max} = \sqrt{2} U_2. \quad (12.6)$$

На рисунку 12.2 приводиться принципова схема однофазного двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом. Випрямляч складається з трансформатора  $TV$ , діодів  $VD1$ ,  $VD2$  та навантаження  $R_H$ .



а – схема; б – часові діаграми напруги

Рисунок 12. 2 – Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом

Основні співвідношення для однофазного двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом:

$$U_{HCEP} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9U_2 \quad (12.7)$$

звідси

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{HCEP} \approx 1,11U_{HCEP}. \quad (12.8)$$

Коефіцієнт пульсацій

$$K_{\Pi} = 0,67. \quad (12.9)$$

Середній струм через діод

$$I_a = \frac{I_{HCEP}}{2}. \quad (12.10)$$

Зворотна напруга, що прикладається до закритого діода:

$$U_{зв\max} = 2\sqrt{2}U_2 \quad (12.11)$$

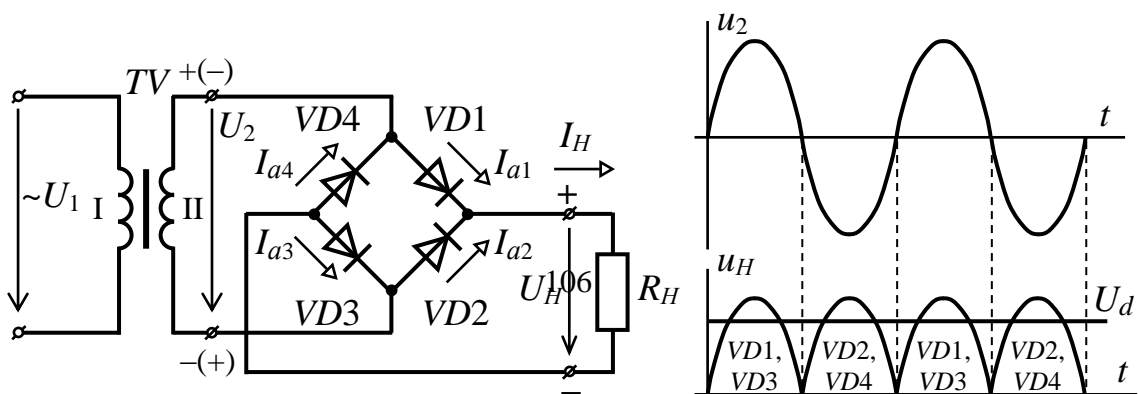
або

$$U_{зв\max} = \pi U_{HCEP}. \quad (12.12)$$

Струм вторинної обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi}{4} I_{HCEP}. \quad (12.13)$$

На рисунку 12.2 приводиться принципова схема однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча. У схему випрямляча входять трансформатор  $TV$  з однією вторинною обмоткою і випрямний міст з чотирьох діодів  $VD1$ - $VD4$ .



а – схема; б – часові діаграми напруги

Рисунок 12.3 – Однофазний мостовий випрямляч

Основні співвідношення для однофазного мостового випрямляча визначаються співвідношеннями (12.7-12.9).

Максимальна зворотна напруга

$$U_{зв\max} = \sqrt{2}U_2 = \frac{\pi}{2}U_{HCEP}, \quad (12.14)$$

тобто вона вдвічі менше, ніж в схемі випрямляча з нульовою точкою.

Струм вторинної обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}I_{HCEP}. \quad (12.15)$$

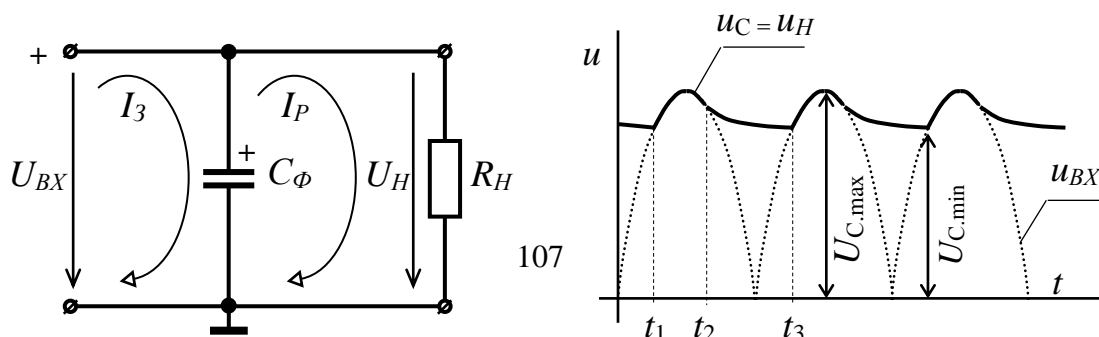
Випрямлячі призначені для живлення постійним струмом різних систем і пристроїв промислової електроніки.

**Згладжувальні фільтри** призначені для зменшення пульсацій випрямленої напруги, включаються в схему джерела живлення після випрямляча.

Основним параметром згладжувальних фільтрів є коефіцієнт згладжування, який дорівнює відношенню коефіцієнта пульсацій на вході фільтру до коефіцієнта пульсацій на його виході, тобто

$$q = \frac{K_{ПВХ}}{K_{ПВИХ}}. \quad (12.16)$$

Найпростіший ємнісний фільтр  $C_\Phi$  вмикають паралельно навантаженню  $R_H$  (рисунок 12.4, а).



а – схема; б – часові діаграми напруги

Рисунок 12.4 – Схема ємнісного фільтру та часові діаграми напруги однофазного двонапівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром

## 12.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення і класифікацію випрямлячів однофазного струму.

2. Привести схеми однофазних випрямлячів: а) однофазної однопівперіодної; б) однофазної двонапівперіодної з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора; в) однофазної двонапівперіодної мостової.

3. Для схем однофазних випрямлячів визначити параметри випрямленої напруги: середнє значення випрямленої напруги  $U_{H\text{ СЕР}}$  ( $U_d$ ), середнє значення випрямленого струму  $I_{H\text{ СЕР}}$  ( $I_d$ ), коефіцієнт пульсацій  $K_{\Pi}$  і зворотну напругу діодів  $U_{ЗВ\text{ max}}$  при заданих значеннях напруги на вторинній обмотці трансформатора  $U_2$  і опору резистора навантаження  $R_H$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 12.1.

Таблиця 12.1 – Вихідні дані

№ вар.	$U_2$ , В	$R_H$ , Ом	№ вар.	$U_2$ , В	$R_H$ , Ом	№ вар.	$U_2$ , В	$R_H$ , Ом
1	10	20	11	60	70	21	10	55
2	15	25	12	55	75	22	14	60
3	20	30	13	50	80	23	18	65
4	25	35	14	45	20	24	22	70
5	30	40	15	40	25	25	26	75
6	35	45	16	35	30	26	30	80
7	40	50	17	30	35	27	34	85
8	45	55	18	25	40	28	38	90
9	50	60	19	20	45	29	42	95
10	55	65	20	15	50	30	44	100

4. Для схем однофазних випрямлячів побудувати графіки зміни в часі напруг на діодах і резисторі навантаження при синусоїдальній вхідній напрузі.

5. Привести класифікацію згладжувальних фільтрів і описати роботу ємнісного фільтра.

### 12.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження однофазного однонапівперіодного випрямляча (рисунок 12.5).

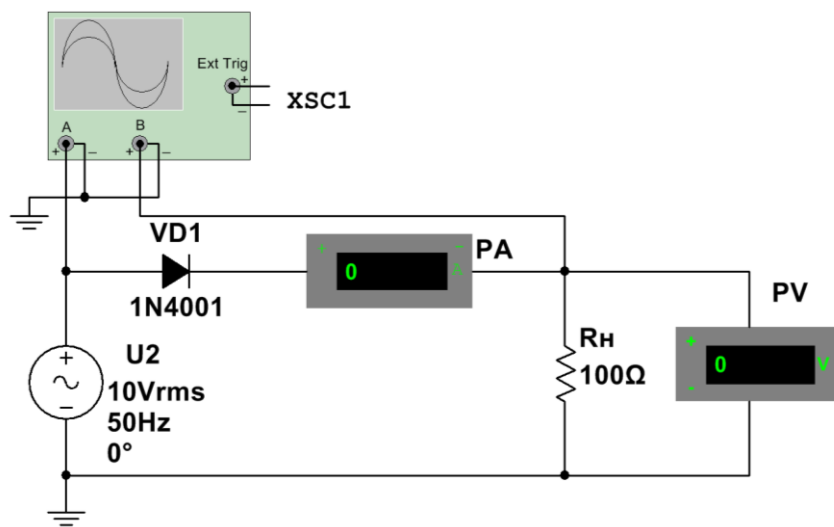


Рисунок 12.5 – Схема дослідження однофазного однонапівперіодного випрямляча

2. Установити задане значення напруги джерела живлення  $U_2$  і опору резистора навантаження  $R_H$  (таблиця 12.1).

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Записати показання приладів: вольтметра  $PV$  (середнє значення випрямленої напруги  $U_{H\text{ СЕР}}$ ) і амперметра  $PA$  (середнє значення випрямленого струму  $I_{H\text{ СЕР}}$ ).

5. На віртуальному осцилографі за допомогою візирних ліній визначити амплітудні значення вхідної і вихідної напруги випрямляча. Визначити величину падіння напруги на діоді.

6. Привести осцилограми вхідної і вихідної напруги випрямляча (див. рисунок 12.6).

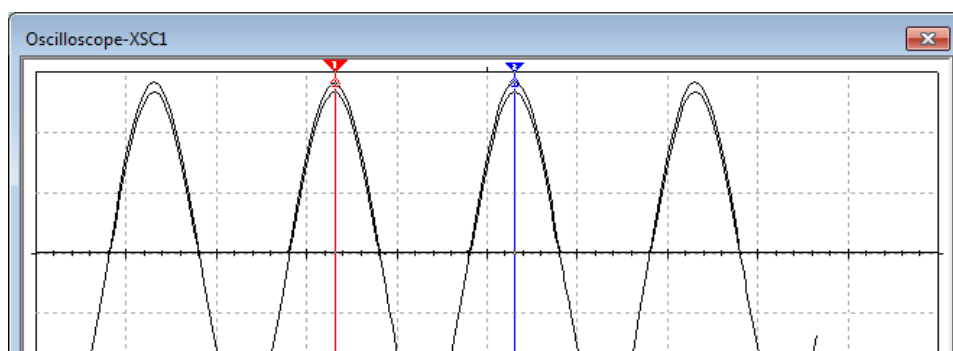


Рисунок 12.6 – Осцилограми напруг однофазного  
однапівперіодного випрямляча

7. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора (рисунок 12.7).

8. Виконати п.п. 2-6.

9. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча (рисунок 12.9).

10. Виконати п.п. 2, 3.

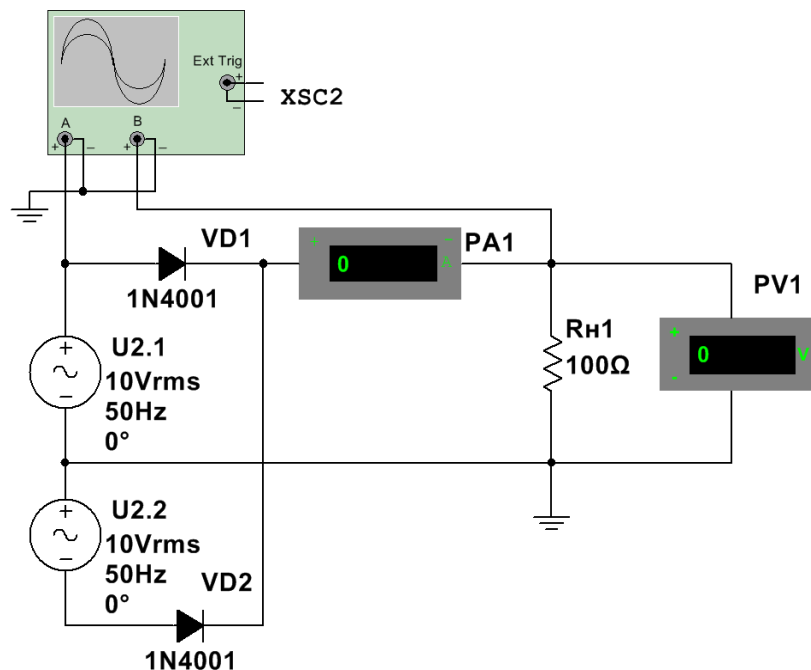


Рисунок 12.7 – Схема дослідження однофазного двонапівперіодного випрямляча з середньою точкою

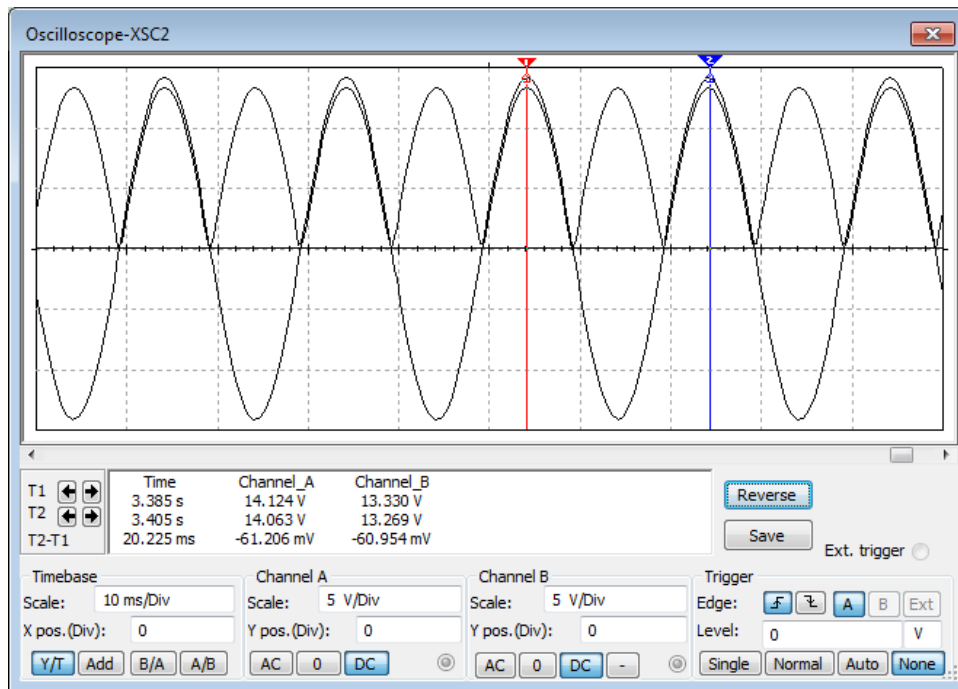


Рисунок 12.8 – Осцилограми напруг однофазного двонапівперіодного випрямляча з середньою точкою

11. Включити схему. При відключеному конденсаторі  $C$  згладжувального фільтра (перемикач  $S1$  розімкнуть) записати показання приладів: вольтметра  $PV$  (середнє значення випрямленої напруги  $U_{H\text{ CEP}}$ ) і амперметра  $PA$  (середнє значення випрямленого струму  $I_{H\text{ CEP}}$ ) і привести осцилограми напруги на виході випрямляча (див. рисунок 12.10).

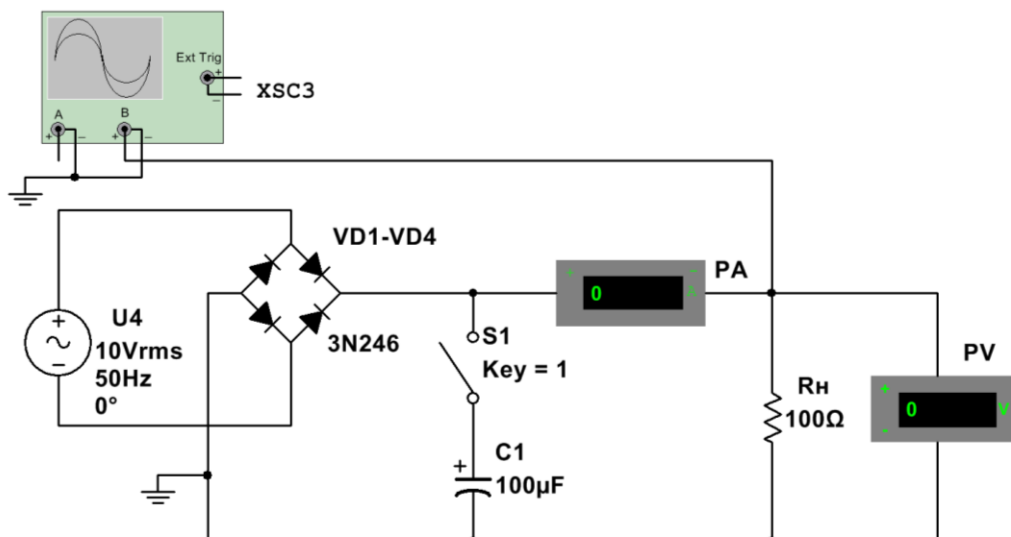


Рисунок 12.9 – Схема дослідження однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча

12. За допомогою перемикача  $S1$  підключити конденсатор  $C$  згладжувального фільтра і, змінюючи величину ємності конденсатора згідно таблиці 1, записати показання приладів (вольтметра  $PV$ , амперметра  $PA$ ) і привести осцилограми вихідної напруги випрямляча (див. рисунок 12.11).

Таблиця 12.2 – Результати експериментальних досліджень ємнісного згладжувального фільтра

$C$ , мкФ	0	10	50	100	200	500	1000
$U_{HCEP}$ , В							
$I_{HCEP}$ , А							

13. За даними таблиці 12.2 побудувати графік залежності вихідної напруги мостового випрямляча від величини ємності конденсатора згладжувального фільтра:  $U_{HCEP} = f(C)$ .

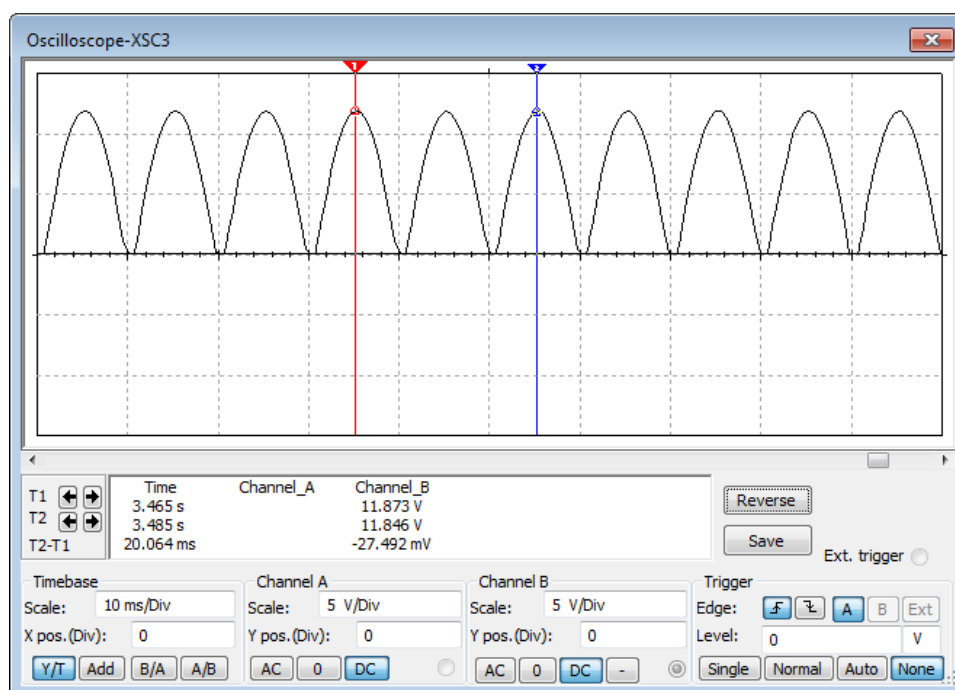




Рисунок 12.10 – Осцилограма напруги на виході однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча

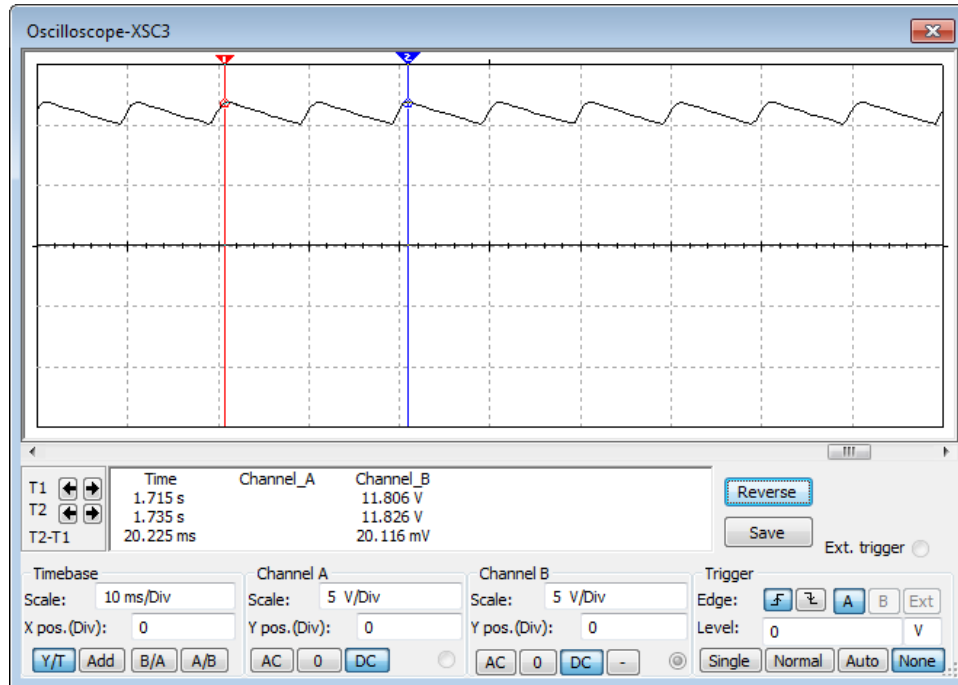


Рисунок 12.11 – Осцилограма напруги на виході однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча з ємнісним згладжувальним фільтром

### Контрольні питання

1. Наведіть визначення і класифікацію випрямлячів однофазного струму.
2. Поясніть призначення випрямлячів.
3. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного однонапівперіодного випрямляча.
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного двонапівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора.
5. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча.
6. Наведіть основні розрахункові співвідношення для однофазних випрямлячів.
7. Наведіть визначення і класифікацію згладжувальних фільтрів.

8. Поясніть призначення згладжувальних фільтрів.
9. Поясніть принцип роботи ємнісного згладжувального фільтра.
10. Назвіть основні параметри згладжувальних фільтрів.
11. Поясніть, в яких випадках застосовують переважно ємнісні або індуктивні згладжувальні фільтри?

## 13 ВИПРЯМЛЯЧІ З МНОЖЕННЯМ НАПРУГИ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження схем однофазних випрямлячів з множенням напруги.

### 13.1 Загальні теоретичні відомості

**Випрямлячі з множенням напруги** дозволяють отримати на виході пристрою напругу, в будь-яке число разів більше напруги на його вході. Такі випрямлячі використовуються для живлення малопотужних високовольтних пристроїв. Принцип роботи схем множення напруги ґрунтується на властивості конденсаторів накопичувати електричну енергію – застосовуються декілька конденсаторів, кожен з яких заряджається від однієї і тієї ж обмотки трансформатора, але через різні діоди.

Схема подвоювача напруги наведена на рисунку 13.1.

Подвоювач напруги працює наступним чином. У один з напівперіодів вхідної напруги  $U_2$ , коли потенціал точки  $b$  вище за потенціал точки  $a$ , конденсатор  $C1$  заряджається через відкритий діод  $VD1$  до амплітудного значення вхідної напруги  $U_{2m}$ . В цей час діод  $VD2$  закритий. У наступний напівперіод потенціал точки  $b$  нижче за потенціал точки  $a$ , і напруга на конденсаторі  $C1$  підсумовується з вхідною напругою, внаслідок чого конденсатор  $C2$  заряджається через відкритий діод  $VD2$  до подвоєного амплітудного значення вхідної напруги  $2U_{2m}$ .

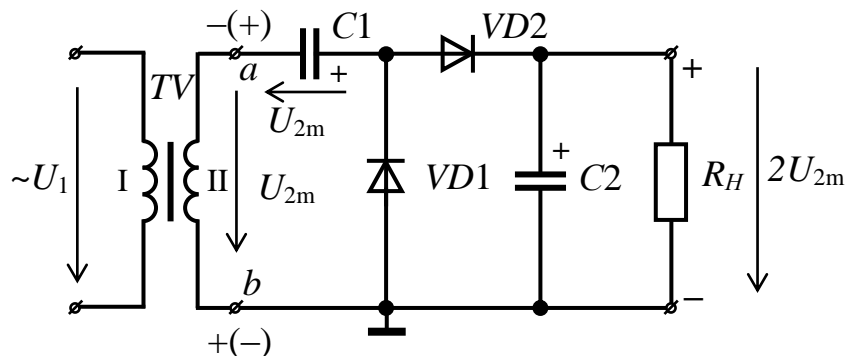


Рисунок 13.1 – Схема подвоювача напруги

На рисунку 13.2 наведена схема випрямляча з множенням напруги другого роду, в який додані кола з діодів і конденсаторів. Схема дозволяю отримати вихідну напругу в 3, 4, 5, 6 разів більшу за вхідну.

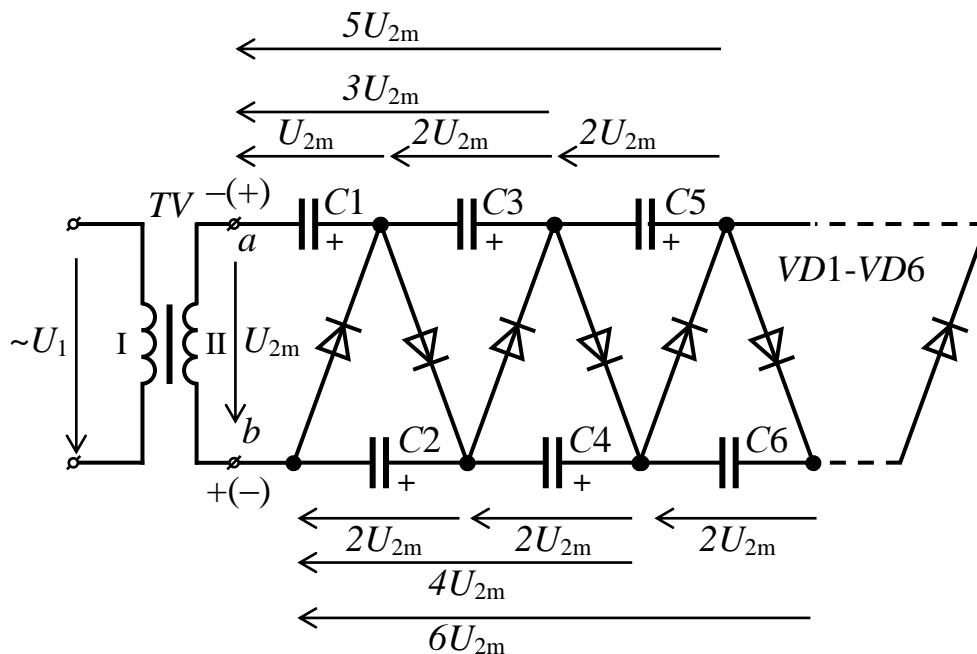


Рисунок 13.2 – Схема випрямляча з множенням напруги другого роду

### 13.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення випрямляча з множенням напруги.
2. Привести схеми однофазних випрямлячів з множенням напруги: а) з подвоєнням напруги; б) з множенням напруги на чотири.
3. Описати принцип роботи однофазного випрямляча з подвоєнням напруги.
4. Скласти схему однофазного випрямляча з множенням напруги при заданих значеннях коефіцієнта множення напруги  $n$ , напруги джерела живлення  $U_1$ , ємності конденсаторів  $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$  і опору навантаження  $R_H$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 13.1.

Таблиця 13.1 – Вихідні дані

№ вар	$U_1$ , В	$C$ , мкФ	$R_H$ , кОм	$n$	№ вар	$U_1$ , В	$C$ , мкФ	$R_H$ , кОм	$n$
1	20	500	0,5	3	16	25	2000	2,6	3
2	16	600	0,7	5	17	20	1800	2,4	5
3	12	700	0,9	6	18	15	1600	2,2	6
4	8	800	1,1	7	19	10	1400	2,0	7
5	4	900	1,3	8	20	6	1200	1,8	8
6	30	1000	1,5	3	21	17	1000	1,6	3
7	25	1100	1,7	5	22	15	800	1,4	5
8	20	1200	1,9	6	23	13	600	1,2	6
9	15	1300	2,1	7	24	11	1900	1,0	7
10	10	1400	2,3	8	25	9	1700	0,8	8
11	40	1500	2,5	3	26	18	1500	0,6	3
12	30	1600	2,7	5	27	16	1300	0,4	5
13	20	1700	2,9	6	28	14	1100	0,7	6
14	10	1800	3,0	7	29	12	900	0,9	7
15	5	1900	2,8	8	30	10	700	1,1	8

### 13.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження однофазного випрямляча з подвоєнням напруги (рисунки 13.3).

2. Установити задані значення напруги джерела живлення  $U_1$ , ємності конденсаторів  $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$  і опору навантаження  $R_H$  (таблиця 13.1).

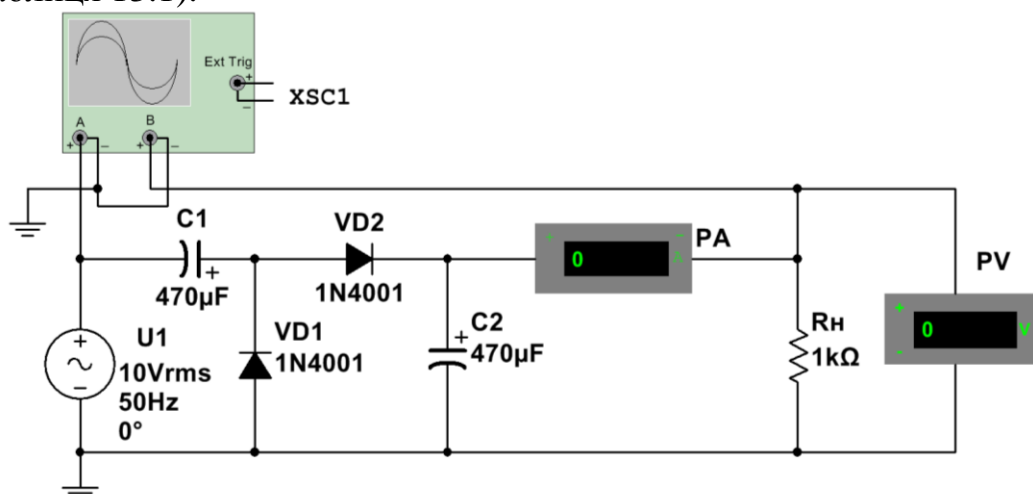


Рисунок 13.3 – Схема дослідження однофазного випрямляча з подвоєнням напруги

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Записати показання приладів: вольтметра *PV* (середнє значення випрямленої напруги  $U_d$ ) і амперметра *PA* (середнє значення випрямленого струму  $I_d$ ).

5. На віртуальному осцилографі за допомогою візирних ліній визначити амплітудні значення вхідної і вихідної напруги випрямляча з множенням напруги.

6. З віртуального осцилографа привести осцилограми вхідної і вихідної напруги випрямляча з множенням напруги (див. рисунок 13.4).

7. Набрати схему для дослідження однофазного випрямляча з множенням напруги на чотири (рисунок 13.5).

8. Виконати п.п. 2-6.

9. Набрати схему для дослідження однофазного випрямляча з множенням напруги при заданому значенні коефіцієнта множення напруги  $n$ , розроблену в п. 2.14.2.

10. Виконати п.п. 2-6.

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення випрямлячів з множенням напруги.

2. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного випрямляча з подвоєнням напруги.

3. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного випрямляча з множенням напруги на три.

4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного випрямляча з множенням напруги на чотири.

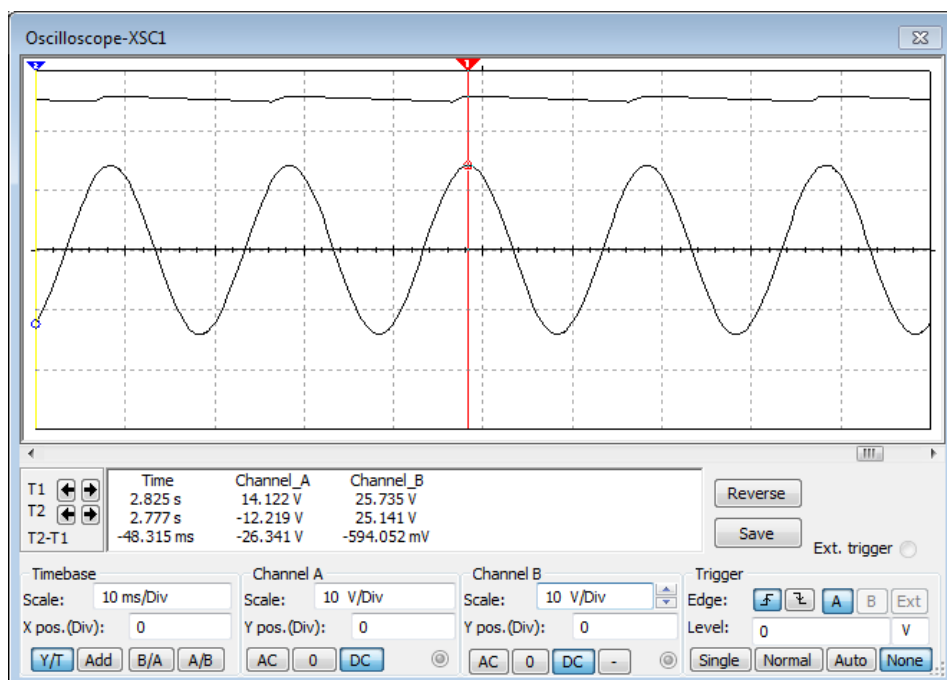


Рисунок 13.4 – Осцилограми напруг однофазного випрямляча з множенням напруги на два

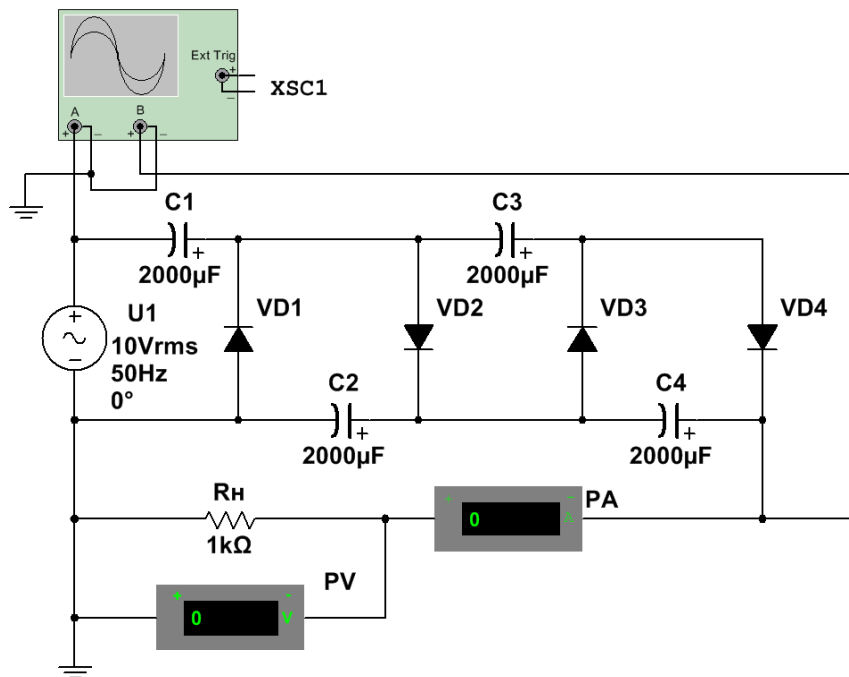


Рисунок 13.5 – Схема дослідження однофазного випрямляча з множенням напруги на чотири

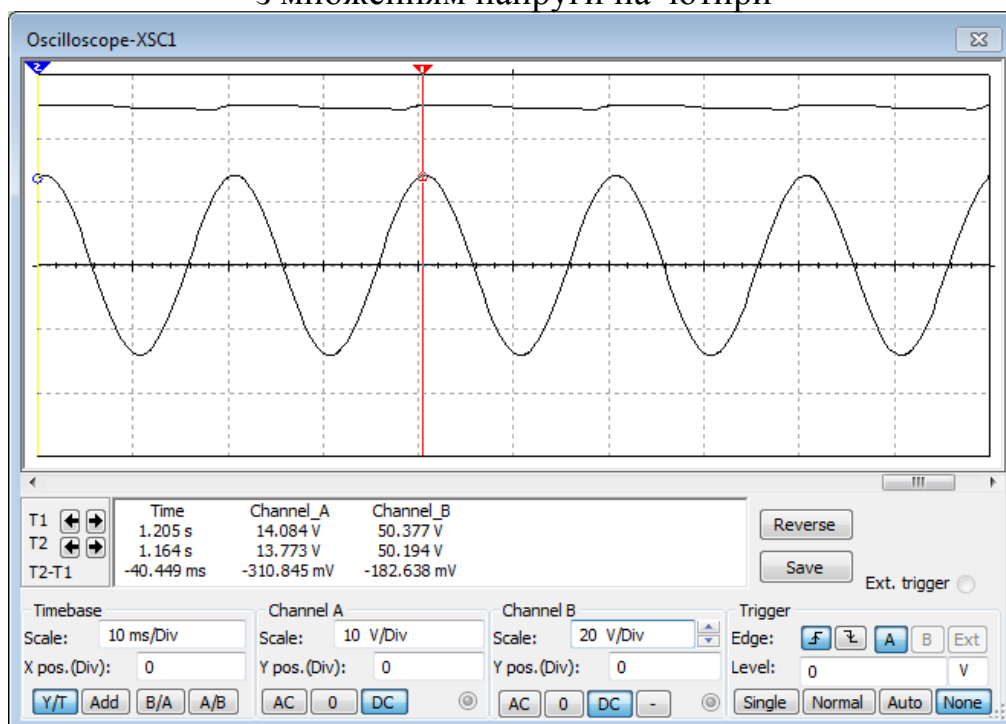


Рисунок 13.6 – Осцилограми напруг однофазного випрямляча з множенням напруги на чотири

## 14 ПАРАМЕТРИЧНІ СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження параметричних стабілізаторів напруги.

### 14.1 Загальні теоретичні відомості

**Стабілізатори напруги** – це електронні пристрої, призначені для автоматичної підтримки незмінного значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела або опору (струму) навантаження.

За принципом роботи стабілізатори напруги підрозділяються на параметричні та компенсаційні.

Параметричний метод стабілізації базується на зміні параметрів нелінійного елементу стабілізатора в залежності від зміни дестабілізуючого чинника.

Схема параметричного стабілізатора напруги наведена на рисунку 14.1, а. Вона складається з баластного резистора  $R_B$  і стабілітрона  $VD$ . Стабілізатор підключається до виходу випрямляча з фільтром. Навантаження увімкнене паралельно стабілітрону.

Особливості роботи такого стабілізатора напруги засновані на тому, що напруга стабілітрона на зворотній гілці його ВАХ змінюється незначно в широкому діапазоні зміни зворотного струму стабілітрона. Зміна напруги на вході стабілізатора зумовлює значну зміну струму стабілітрона при незначній зміні напруги на ньому.

Стабілізатори характеризуються коефіцієнтом стабілізації

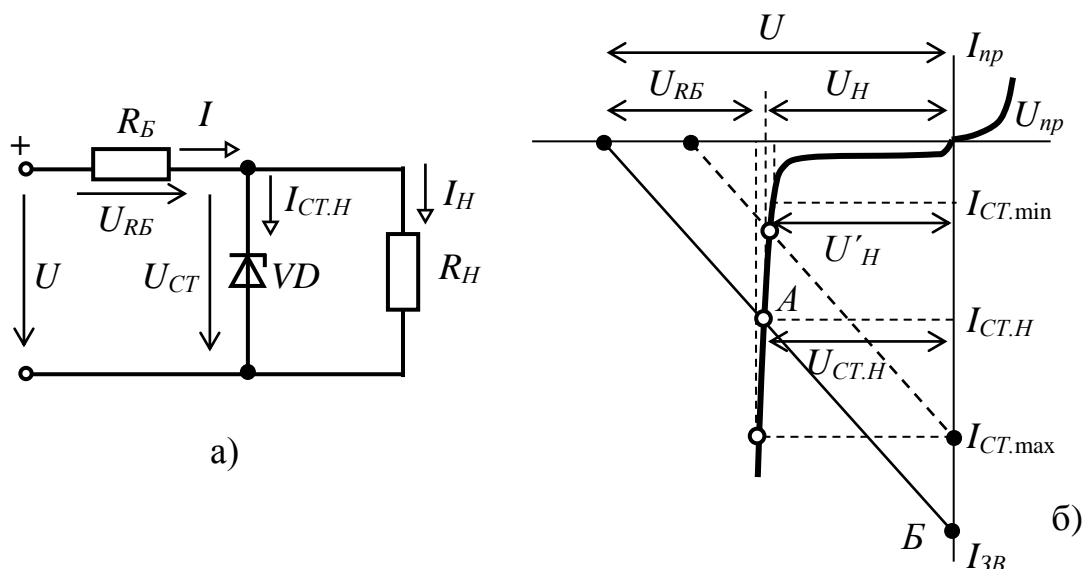
$$k_{CT} = \frac{\Delta U_{BX} / U_{BX}}{\Delta U_{ВИХ} / U_{ВИХ}}, \quad (14.1)$$

який для параметричних стабілізаторів складає  $k_{CT} = 20 \dots 50$ .

Рівняння електричної рівноваги стабілізатора має вигляд

$$U = U_H + IR_B, \quad (14.2)$$

де  $R_B$  – баластний резистор, необхідний для зменшення впливу дестабілізуючих чинників на напругу навантаження.



а – схема; б – графічна інтерпретація принципу роботи

Рисунок 14.1 – Параметричний стабілізатор напруги

Опір баластного резистора  $R_B$  вибирають таким, щоб при номінальному значенні напруги джерела  $U$ , напруга і струм стабілітрона також відповідали номінальним значенням  $I_{CT.H}$ . Величину  $I_{CT.H}$  визначають за паспортними даними стабілітрона за виразом:

$$I_{CT.H} = \frac{I_{CT.min} + I_{CT.max}}{2}. \quad (14.3)$$

З рівняння (14.2) опір баластного резистора

$$R_B = \frac{U - U_{CT.H}}{I_{CT.H} + I_H}, \quad (14.4)$$

де  $I_H = P_H / U_H$ ;  $U \approx U_d$ ;  $I = I_{CT.H} + I_H$ .

Роботу параметричного стабілізатора розглянемо за допомогою ВАХ стабілітрона і лінії навантаження (рисунок 14.1, б). Характеристика навантаження будується (при номінальній напрузі джерела) по двох точках, а саме: точка А має координати  $U_{CT.H}$ , точка Б знаходиться на осі ординат, яка визначається за виразом  $I = U/R_B$ .



Якщо вхідна напруга стабілізатора  $U$  збільшиться на  $\Delta U$ , наприклад, через підвищення напруги мережі, тоді лінія навантаження АБ зміститься паралельно самій собі і займе положення, що відповідає струму  $I_{CT.\max}$  і напрузі  $U'_H$ , в той час як напруга  $U_{CT} = U_H$  залишиться практично незмінною. Напруга на стабілітроні залишиться незмінною також і при зниженні вхідної напруги стабілізатора та при змінах струму навантаження.

Перевагою параметричних стабілізаторів є простота конструкції і надійність роботи, а недоліком – низький коефіцієнт стабілізації та к.к.д., а також вузький і нерегульований діапазон стабілізованої напруги.

#### 14.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Привести схему параметричного стабілізатора напруги.
3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи параметричного стабілізатора напруги.

4. Виконати розрахунок параметричного стабілізатора напруги (визначити струм  $I_H$  і опір  $R_H$  навантаження; вибрати тип стабілітрона і його паспортні дані:  $U_{CT.H}$ ,  $I_{CT.\min}$ ,  $I_{CT.\max}$ ,  $R_D$ ; визначити номінальний струм стабілізації стабілітрона  $I_{CT.H}$  і опір баластного резистора  $R_B$ ).

**Вихідні дані:** потужність  $P_H$  і напруга  $U_H$  навантаження; напруга на вході стабілізатора  $U_{BX}$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 14.1.

Таблиця 14.1 – Вихідні дані

№ вар.	$P_H$ , мВт	$U_H$ , В	$U_{BX}$ , В	№ вар.	$P_H$ , мВт	$U_H$ , В	$U_{BX}$ , В
1	100	5	10	16	190	14	40
2	80	6	15	17	220	16	45
3	60	7	20	18	240	18	50
4	200	10	25	19	70	4	10
5	160	12	30	20	110	7	15
6	140	14	35	21	150	10	20
7	120	16	40	22	190	13	25
8	170	18	45	23	230	16	30
9	190	22	50	24	270	19	35
10	50	3	10	25	310	22	40
11	90	4	15	26	350	25	45
12	110	5	20	27	390	28	50
13	130	7	25	28	90	4	10
14	150	10	30	29	120	6	15

15	170	12	35	30	140	8	20
----	-----	----	----	----	-----	---	----

Порядок розрахунку параметричного стабілізатора напруги.

1) Визначають параметри навантаження:

$$I_H = P_H / U_H, R_H = U_H / I_H.$$

2) Залежно від напруги навантаження  $U_H$  вибирають тип стабілітрона і його паспортні дані:  $U_{CT. H}$ ,  $I_{CT. min}$ ,  $I_{CT. max}$ ,  $R_D$ .

3) Визначають номінальний струм стабілізації стабілітрона:

$$I_{CT. H} = (I_{CT. MIN} + I_{CT. MAX}) / 2.$$

4) Визначають опір баластного резистора:

$$R_B = (U_{BX} - U_{CT. H}) / (I_{CT. H} + I_H).$$

### 14.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim і набрати схему для дослідження параметричного стабілізатора напруги (рисунк 14.2).

2. Установити задані параметри елементів схеми.

3. Включити схему. Змінюючи величину опору навантаження  $R_H = (500 \text{ Ом}; 1 \text{ кОм}; 1,5 \text{ кОм}; 2,0 \text{ кОм}; 2,5 \text{ кОм})$  при вхідній напрузі  $U_{BX} = 20 \text{ В}$ , зняти показання приладів. Результати вимірів занести в таблицю 14.2.

Таблиця 14.2 – Результати експериментальних досліджень параметричного стабілізатора напруги при  $R_H = \text{var}$ ,  $U_{BX} = \text{const}$

$R_H$ , Ом	$I_1$ , мА (PA1)	$I_{CT}$ , мА (PA2)	$I_H$ , мА (PA3)	$U_{ВНХ}$ , В (PV2)

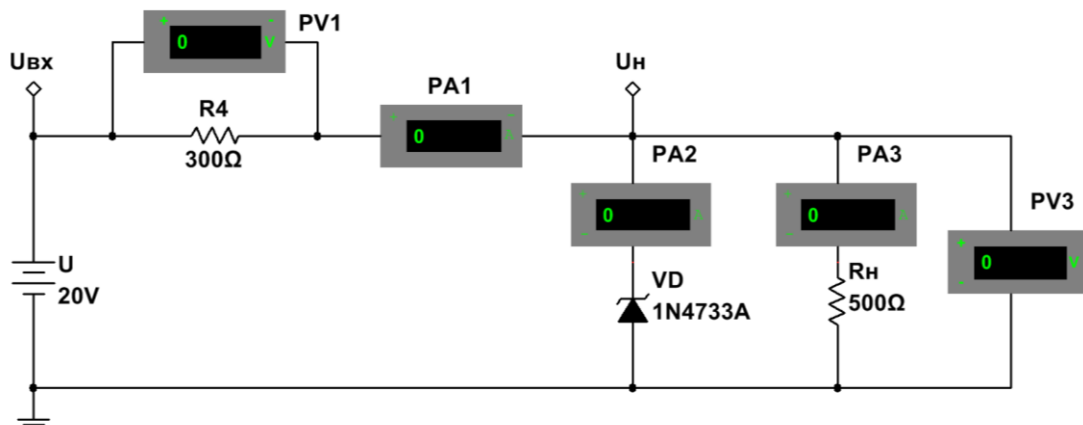


Рисунок 14.2 – Схема для дослідження параметричного стабілізатора напруги

4. За даними таблиці 14.2 побудувати вихідну характеристику стабілізатора  $U_{ВНХ} = f(I_H)$ .

5. Змінюючи величину вхідної напруги  $U_{ВХ} = (10 \text{ В}; 15 \text{ В}; 20 \text{ В}; 25 \text{ В}; 30 \text{ В})$  при величині опору навантаження  $R_H = 500 \text{ Ом}$  зняти показання приладів. Результати вимірів занести в таблицю 14.3.

Таблиця 14.3 – Результати експериментальних досліджень параметричного стабілізатора напруги при  $U_{ВХ} = \text{var}$ ,  $R_H = \text{const}$

$U_{ВХ}, \text{ В}$	$I_1, \text{ мА (РА1)}$	$I_{СТ}, \text{ мА (РА2)}$	$I_H, \text{ мА (РА3)}$	$U_{ВНХ}, \text{ В (РВ2)}$

6. Визначити коефіцієнт стабілізації

$$[k_{СТ} = (\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ}) / (\Delta U_{ВНХ} / U_{ВНХ})].$$

7. Визначити диференціальний опір стабілітрона на ділянці стабілізації  $[R_D = \Delta U_{СТ} / \Delta I_{СТ}]$ .

### Контрольні питання

1. Наведіть визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Поясніть призначення стабілізаторів напруги.
3. Поясніть, на чому базується параметричний метод стабілізації?
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи параметричного стабілізатора напруги.
5. Наведіть порядок розрахунку параметричного стабілізатора напруги.
6. Наведіть умови вибору стабілітрона для параметричного стабілізатора напруги.
7. Наведіть графічну інтерпретацію роботи параметричного стабілізатора напруги.
8. Назвіть основні параметри стабілізаторів напруги.

## 15 КОМПЕНСАЦІЙНІ СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження компенсаційних стабілізаторів напруги.

### 15.1 Загальні теоретичні відомості

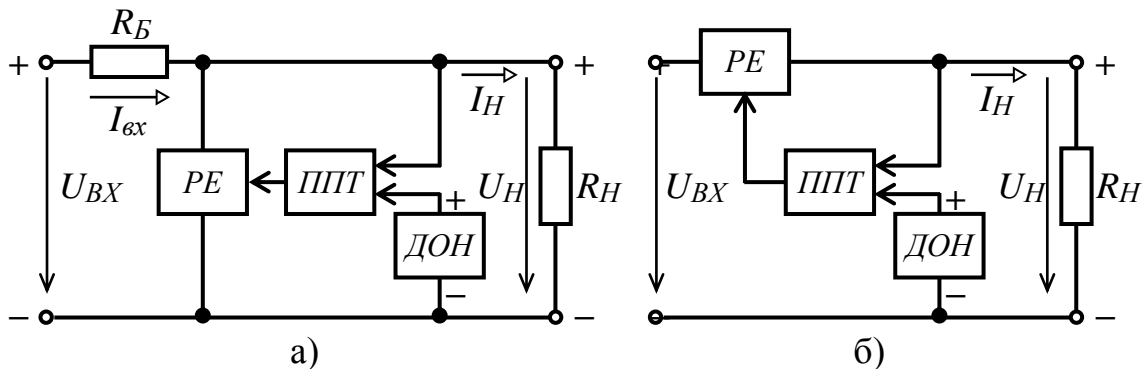
Порівнянні з параметричними компенсаційні стабілізатори напруги мають вищий коефіцієнт стабілізації ( $k_{CT} \geq 50$ ) і менший вихідний опір. Їх принцип роботи заснований на тому, що зміна напруги на навантаженні (під дією зміни  $U_{BX}$  або  $I_H$ ) передається на регулюючий елемент, що спеціально вводиться в схему і перешкоджає зміні напруги  $U_H$ .

Регулюючий елемент (транзистор) може бути увімкнений або паралельно навантаженню, або послідовно з ним. Залежно від цього розрізняють два типи компенсаційних стабілізаторів напруги: паралельні (рисунок 15.1, а) і послідовні (рисунок 15.1, б).

Дія на регулюючий елемент (РЕ) в обох типах стабілізаторів здійснюється керуючою схемою в яку входять підсилювач постійного струму (ППС) і джерело опорної напруги (ДОН). За допомогою ДОН проводять порівняння напруги на навантаженні з опорною напругою. Функція ППС зводиться до підсилення різниці порівнюваної напруги і подачі посиленого сигналу безпосередньо на регулюючий елемент.

У схемі (рисунок 15.1, а) стабілізація напруги на навантаженні досягається, як і в параметричному стабілізаторі, зміною напруги на баластному резисторі  $R_B$  шляхом зміни струму регулюючого елементу.

У схемі (рисунок 15.1, б) регулюючий елемент увімкнений послідовно з навантаженням. Стабілізація напруги навантаження здійснюється шляхом зміни напруги на регулюючому елементі. Струм регулюючого елементу тут дорівнює струму навантаження.



а – паралельного; б – послідовного

Рисунок 15.1 – Структурні схеми компенсаційних стабілізаторів напруги

Принцип дії компенсаційних стабілізаторів постійної напруги заснований на зміні опору регулюючого елементу.

Енергетичні показники, зокрема к.к.д., послідовних стабілізаторів напруги вищі, ніж паралельних, тому послідовні стабілізатори більше застосовування на практиці. Також перевагою паралельних стабілізаторів є не критичність до перевантажень за струмом, зокрема коротким замиканням вихідного кола.

Принципова схема компенсаційного стабілізатора напруги послідовного типу наведена на рисунку 15.2.

Транзистор  $VT1$  служить регулюючим елементом, а ППС виконаний на транзисторі  $VT2$ . Джерелом опорної напруги є стабілітрон  $VD$ , який увімкнений в коло емітера транзистора  $VT2$ . Резистори  $R1$ ,  $R2$  є елементами вхідного діляника напруги. Напруга між базою і емітером транзистора  $VT2$

$$U_{BE2} = \frac{R2}{R1 + R2} U_H - U_{оп}. \quad (15.1)$$

Резистор  $R$  використовують для виведення стабілітрона на робочу ділянку характеристики, якщо струм  $I_{E2}$  транзистора  $VT2$  надто малий.

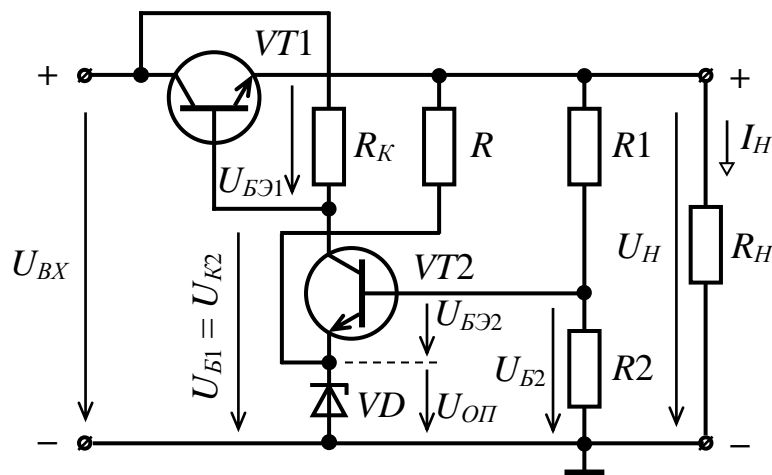


Рисунок 15.2 – Схема компенсаційного стабілізатора напруги послідовного типу

Опорна напруга, що задається стабілітроном  $VD$  порівнюється з напругою на резисторі  $R2$ , яка пропорційна вихідній напрузі стабіліза-

тора, оскільки цей резистор є плечем дільника напруги  $R1R2$ . Різниця цієї напруги підсилюється транзистором  $VT2$  і падає на резисторі  $R_K$ . Ця напруга, в свою чергу, є вхідною напругою регулюючого елементу  $VT1$  і, тому, обумовлює зміну напруги  $U_{KE}$  транзистора  $VT1$ , завдяки чому забезпечується стабілізація вихідної напруги.

## 15.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Привести схему компенсаційного стабілізатора напруги.
3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи стабілізатора напруги.
4. Виконати розрахунок стабілізатора напруги.

**Вихідні дані:** номінальна вихідна напруга  $U_{H.BIX}$ ; межі регулювання вихідної напруги  $\Delta U_{BIX} = U_{BIX.max} - U_{BIX.min}$ ; номінальний струм навантаження  $I_{H.HOM}$ ; зміна вхідної напруги  $\Delta U_{BX}$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 15.1.

Порядок попереднього розрахунку стабілізатора напруги.

Визначають:

- мінімальну вхідну напругу

$$U_{BX.min} = U_{BIX.max} + (4...5), \quad (15.2)$$

$$\text{де } U_{BIX.max} = U_{H.BIX} + \Delta U_{BIX};$$

- номінальну вхідну напругу

$$U_{H.BX} = U_{BX.min} + \Delta U_{BX}; \quad (15.3)$$

- максимальну вхідну напругу

$$U_{BX.max} = U_{BX.min} + 2\Delta U_{BX}. \quad (15.4)$$

Вибирають тип стабілітрона  $VD$  за напругою стабілізації з умови:

$$U_{CT} = U_{BIX.min} - (2...3). \quad (15.5)$$

Опір резистора  $R2$  обирається в межах

$$R2 = (430...560) \text{ Ом},$$

при якому мінімальний струм більшості стабілітронів складає  $I_{CT.min} = 5 \text{ мА}$ .

Опір резистора  $R1$

$$R1 = \frac{U_{BX} - U_{BIX.max}}{(3...5)}. \quad (15.6)$$

Сумарний опір  $R_d$  резисторів дільника напруги  $R3R5$  (кОм)

$$R_d = \frac{U_{H.BIX}}{(5...10)}. \quad (15.7)$$

При цьому опір резисторів дільника визначають з виражень:

$$R5 = \frac{R_D U_{CT}}{U_{BIX.max}}; \quad (15.8)$$

$$R4 = R_D \left( 1 - \frac{U_{CT}}{U_{BIX.min}} \right); \quad (15.9)$$

$$R3 = R_D - R4 - R5. \quad (15.10)$$

Таблиця 15.1 – Вихідні дані

№ вар	$\pm \Delta U_{BX}$ , В	$U_{H\ BIX}$ , В	$\pm \Delta U_{BIX}$ , В	$I_{H\ НОМ}$ , мА	№ вар	$\pm \Delta U_{BX}$ , В	$U_{H\ BIX}$ , В	$\pm \Delta U_{BIX}$ , В	$I_{H\ НОМ}$ , мА
1	1,0	5	1	10	16	1,5	10	4	85
2	2,0	10	2	15	17	0,5	5	4,5	90
3	3,0	15	3	20	18	1,0	9	5	85
4	4,0	20	4	25	19	1,5	12	5,5	80
5	5,0	25	5	30	20	2,0	18	6	75
6	6,0	30	1	35	21	2,5	22	1	70
7	1,5	5	2	40	22	3,0	24	1,5	65
8	2,5	10	3	45	23	3,5	27	2	60
9	3,5	15	4	50	24	4,0	30	2,5	55
10	4,5	20	5	55	25	4,5	27	3	50
11	5,5	25	1	60	26	5,0	24	3,5	45
12	6,5	30	2	65	27	4,0	22	4	40
13	4,5	25	2,5	70	28	3,0	18	4,5	35
14	3,5	20	3	75	29	2,0	15	5	30
15	2,5	15	3,5	80	30	1,0	12	5,5	25

### 15.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim і набрати схему для дослідження компенсційного стабілізатора напруги (рисунок 15.3).
2. Установити задані та розраховані параметри елементів схеми.
3. Включити схему. Подати на вхід стабілізатора напругу  $U_{H.BX}$  і резистором  $R4$  установити напругу  $U_{H.BIX}$ . Визначити величину напруги  $U_{BIX}$  при  $U_{BX.min}$  і  $U_{BX.max}$ . Результати вимірів занести в таблицю 15.2.
4. Визначити коефіцієнт стабілізації стабілізатора напруги  $k_{CT} = (\Delta U_{BX}/U_{H\ BX})/(\Delta U_{BIX}/U_{H\ BIX})$ .
5. При номінальній вхідній напрузі  $U_{H.BX}$ , змінюючи опір резистора  $R4$  у межах (0...100)%, визначити  $U_{BIX.min}$  і  $U_{BIX.max}$ .

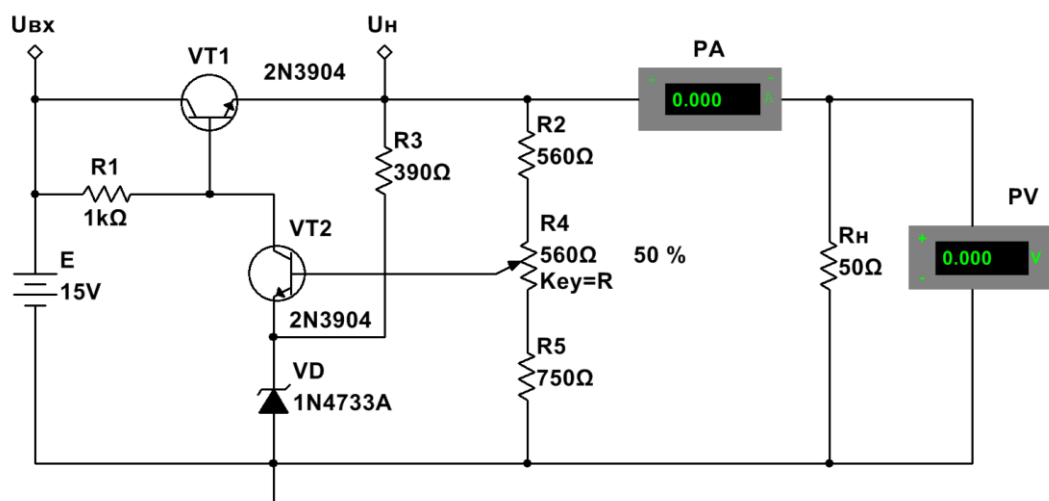


Рисунок 15.3 – Схема дослідження компенсаційного стабілізатора напруги

Таблиця 15.2 – Результати експериментальних досліджень  
компенсаційного стабілізатора напруги при  $U_{BX} = \text{var}$

Напруга	$U_{H.BX}, \text{В}$	$U_{BX.\min}, \text{В}$	$U_{BX.\max}, \text{В}$
$U_{BHX}, \text{В}$			

6. Установити на вході стабілізатора напругу  $U_{H.BX}$  і, змінюючи опір навантаження  $R_H$ , зняти вихідну характеристику стабілізатора  $U_{BHX} = f(I_H)$ . Струм навантаження  $I_H$  змінюють у межах від 0 до  $I_{H.\max}$  (прийняти  $I_{H.\max} = 3I_{H.\text{НОМ}}$ ). Результати вимірів занести в таблицю 15.3.

Таблиця 15.3 – Результати експериментальних досліджень  
компенсаційного стабілізатора напруги при  $R_H = \text{var}$

$I_H, \text{А}$	0			$I_{H.\text{НОМ}}$				$I_{H.\max}$
$U_{BHX}, \text{В}$								

7. За даними таблиці 15.3 побудувати вихідну характеристику стабілізатора  $U_{BHX} = f(I_H)$ .

### Контрольні питання

1. Наведіть визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Поясніть призначення стабілізаторів напруги.
3. Поясніть, на чому базується компенсаційний метод стабілізації?
4. Наведіть структурні схеми паралельного і послідовного компенсаційних стабілізаторів напруги. Поясніть принцип їх роботи.



5. Наведіть схему компенсаційного стабілізатора напруги. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
6. Назвіть основні параметри стабілізаторів напруги.

## 16 ТРИФАЗНІ ВИПРЯМЛЯЧІ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження схем трифазних випрямлячів.

### 16.1 Загальні теоретичні відомості

Для живлення навантажень середньої і великої потужності використовують трифазні випрямні схеми, які до мережі підключаються через трифазні трансформатори – їх обмотки вмикаються «зіркою» або «трикутником». Найбільш розповсюдженими є наступні схеми трифазних випрямлячів:

- 1) однонапівперіодна з нульовим виводом (схема Міткевича);
- 2) двонапівперіодна мостова (схема Ларіонова).

Однонапівперіодна схема з нульовим виводом (схема Міткевича) зображена на рисунку 16.1.

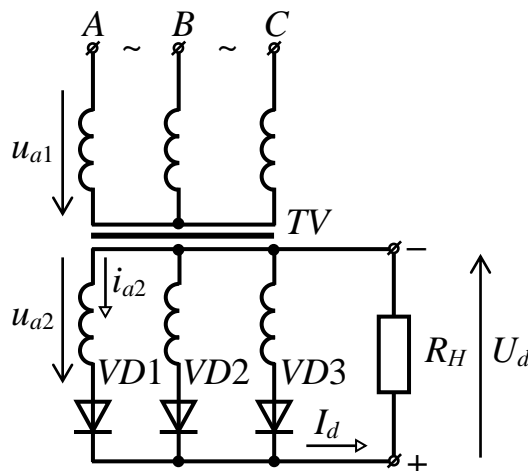


Рисунок 16.1 – Схема трифазного однонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом трансформатора

Ця схема складається із трифазного трансформатора  $TV$ , випрямних діодів  $VD1$ – $VD3$  та резистора навантаження  $R_H$ , який вмикається між спільним виводом вторинних обмоток трансформатора (нульовим виводом) та спільною точкою з'єднання випрямних діодів. Випрямні діоди

працюють по черзі. За період напруги живлення кожен діод знаходиться у провідному стані третину періоду, причому проводить той діод, до анода якого на даний момент прикладена найбільш додатна фазна напруга.

Основні розрахункові співвідношення для схеми Міткевича:

– середнє значення напруги на навантаженні

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 \sqrt{3} = 1,17 U_{2\phi}; \quad (16.1)$$

– діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора

$$U_{2\phi} = 0,85 U_d; \quad (16.2)$$

– гранично-припустиме значення зворотної напруги на діоді

$$U_{3B \text{ MAX}} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_{2\phi} = 2,09 U_d; \quad (16.3)$$

– середнє значення струму через діод

$$I_a = \frac{I_d}{3}; \quad (16.4)$$

– коефіцієнт пульсації випрямленої напруги (при  $m = 3$ )

$$k_{\pi} = \frac{2}{m^2 - 1} = 0,25. \quad (16.5)$$

Частота пульсації випрямленої напруги в три рази перевищує частоту мережі.

Недоліком даної схеми є наявність постійного підмагнічування магнітопроводу трансформатора, зумовленого тим, що, як і у будь-якої однопоточної схеми, вторинною обмоткою трансформатора струм за період проходить лише один раз і в одному напрямку, тобто цей струм має постійну складову. Це вимагає використання трансформатора із підвищеним перерізом магнітопроводу (підвищеної встановленої потужності):

$$S_T = 1,35 P_d. \quad (16.6)$$

Трифазна двонапівперіодна мостова схема (схема Ларіонова) зображена на рисунку 16.2.

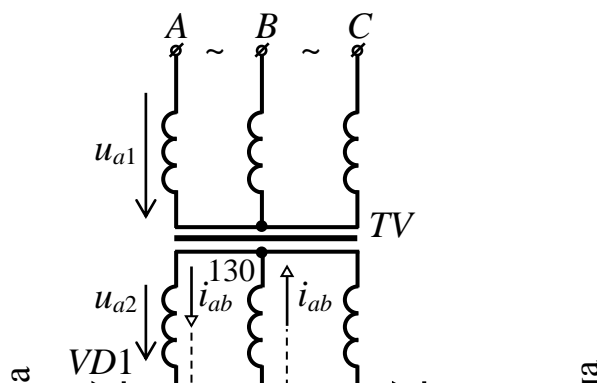


Рисунок 16.2 – Схема трифазного мостового випрямляча

Шість випрямних діодів увімкнені у трифазну мостову схему і утворюють дві групи: анодну  $VD1-VD3$  та катодну  $VD4-VD6$ . Навантаження вмикається між спільними точками анодної і катодної груп діодів.

У провідному стані завжди знаходяться два діоди: один з анодної групи і один з катодної. Причому струм у схемі протікає від фази з найбільш додатною на даний момент напругою до фази з найбільш від'ємною напругою.

Основні розрахункові співвідношення випрямленої напруги:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 \sqrt{3} = 2,34 U_{2\phi}; \quad (16.7)$$

$$U_{2\phi} = 0,425 U_d; \quad (16.8)$$

$$U_{3B \text{ MAX}} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_{2\phi} = 1,045 U_d; \quad (16.9)$$

$$I_a = \frac{I_d}{3}; \quad (16.10)$$

$$k_{II} = \frac{2}{m^2 - 1} = 0,057. \quad (16.11)$$

Частота пульсації випрямленої напруги перевищує частоту мережі у шість разів.

Встановлена потужність трансформатора

$$S_T = 1,05 P_d . \quad (16.12)$$

У цій схемі відсутнє підмагнічування магнітопроводу, оскільки у вторинному колі кожної обмотки трансформатора за період напруги мережі струм протікає двічі, причому у різних напрямках.

Схема Ларіонова у порівнянні зі схемою Міткевича має наступні переваги:

1) за рівних фазних напруг середнє значення випрямленої напруги у два рази вище (потрібно задавати меншу кількість витків вторинних обмоток трансформатора);

2) більш низький коефіцієнт пульсацій (менш ніж шість відсотків), що часто дозволяє використовувати схему Ларіонова без фільтра;

3) краще використання трансформатора за потужністю за рахунок відсутності підмагнічування осердя.

Проте, кількість діодів у схемі Ларіонова в два рази більша, але на даний час це несуттєво (за винятком випрямлення малих за значенням напруг), оскільки вартість діодів невелика порівняно з вартістю трансформатора, який в схемі Міткевича повинен бути приблизно на тридцять відсотків потужнішим.

## 16.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести схеми трифазних випрямлячів: а) з нульовим виводом (схема Міткевича); б) мостової (схема Ларіонова).

2. Для схем трифазних випрямлячів визначити параметри випрямленої напруги: середнє значення випрямленої напруги  $U_d$ , середнє значення випрямленого струму  $I_d$ , коефіцієнт пульсацій  $k_{\Pi}$  і максимальну зворотну напругу на випрямному діоді  $U_{ЗВ \max}$  при заданих значеннях напруги на вторинній обмотці трансформатора  $U_{2\phi}$  і опору навантаження  $R_H$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 16.1.

Таблиця 16.1 – Вихідні дані

№ вар.	$U_{2\phi}$ , В	$R_H$ , кОм	№ вар.	$U_{2\phi}$ , В	$R_H$ , кОм
1	100	0,5	16	150	2,0
2	120	0,6	17	170	2,1
3	140	0,7	18	190	2,2
4	160	0,8	19	210	2,3
5	180	0,9	20	230	2,4
6	200	1,0	21	55	0,55

7	220	1,1	22	75	0,65
8	240	1,2	23	95	0,75
9	80	1,3	24	115	0,85
10	60	1,4	25	135	0,95
11	50	1,5	26	155	1,05
12	70	1,6	27	175	1,15
13	90	1,7	28	195	1,25
14	110	1,8	29	215	1,35
15	130	1,9	30	235	1,45

3. Для схем трифазних випрямлячів побудувати графіки зміни в часі (часові діаграми) напруги на опорі навантаження при синусоїдальній вхідній напрузі:  $u_2 = f(t)$ ,  $u_d = f(t)$ .

### 16.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження трифазного випрямляча з нульовим виводом (рисунок 16.3).

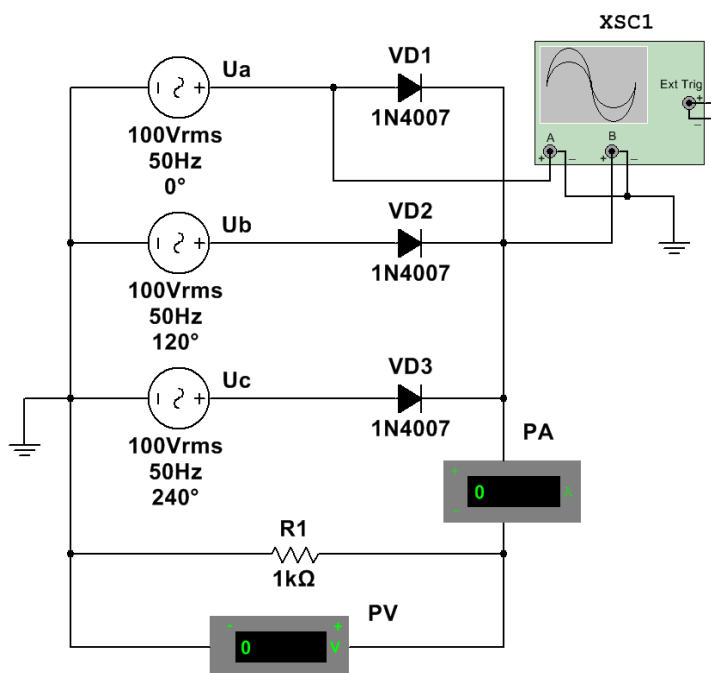


Рисунок 16.3 – Схема для дослідження трифазного випрямляча з нульовим виводом (схема Міткевича)

2. Установити задані значення напруг  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  і опору навантаження  $R_H$  (таблиця 16.1).
3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.
4. Включити схему. Записати показання приладів: вольтметра  $PV$  (середнє значення випрямленої напруги  $U_d$ ) і амперметра  $PA$  (середнє значення випрямленого струму  $I_d$ ).
5. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити амплітудні значення вхідної і вихідної напруги випрямляча.
6. З віртуального осцилографа привести осцилограми вхідної і вихідної напруги випрямляча (див. рисунок 16.4).
7. Набрати схему для дослідження трифазного мостового випрямляча (рисунок 16.5).
8. Виконати п.п. 2-6.

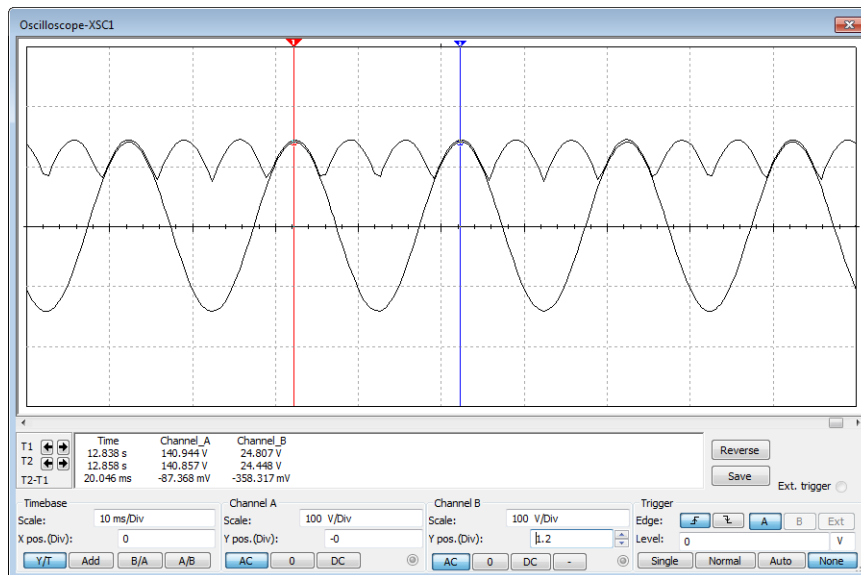


Рисунок 16.4 – Осцилограми напруг трифазного випрямляча з нульовим виводом (схема Міткевича)

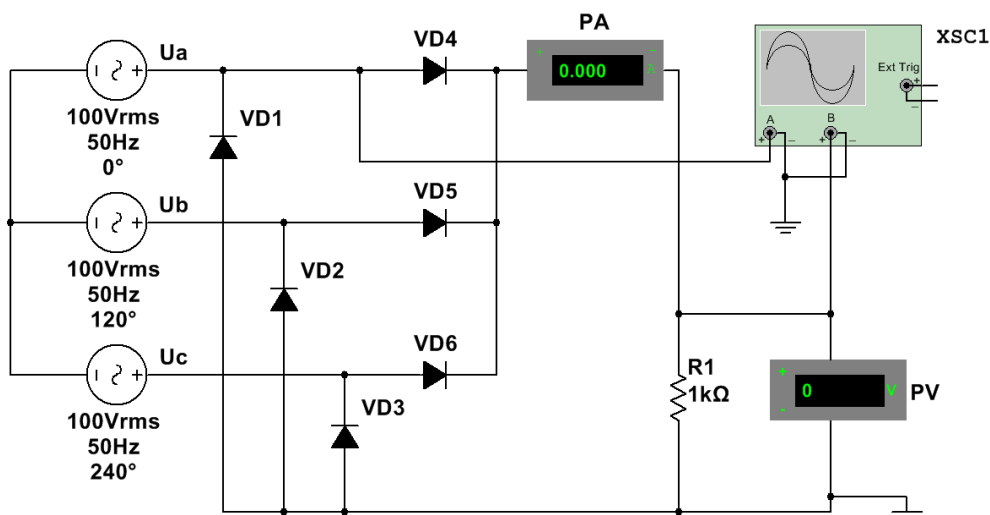


Рисунок 16.5 – Схема для дослідження трифазного мостового випрямляча (схема Ларіонова)

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення трифазних випрямлячів.
2. Поясніть, у яких випадках застосовують трифазні випрямлячі?
3. Наведіть схему і поясніть принцип роботи трифазного випрямляча з нульовим виводом.
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи трифазного мостового випрямляча.
5. Порівняйте схему Міткевича зі схемою Ларіонова. В яких випадках яка з них більш придатна і чому?
6. Наведіть основні розрахункові співвідношення для трифазних випрямлячів.

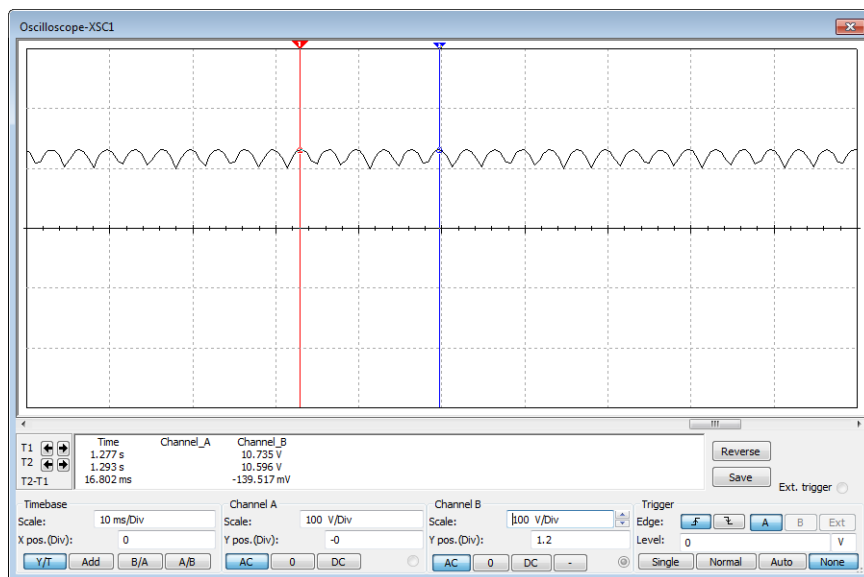


Рисунок 16.6 – Осцилограми вихідної напруги трифазного мостового випрямляча (схема Ларіонова)

## 17 КЕРОВАНІ ВИПРЯМЛЯЧІ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження однофазних керованих випрямлячів.

### 17.1 Загальні теоретичні відомості

Можливість зміни величини постійної напруги на навантаженні за необхідним законом у заданих межах може бути реалізована за допомогою **керованих випрямлячів**, які будуються на керованих вентилях, наприклад, на тиристорах (рисунок 17.1).

За допомогою схеми керування СК, в основу якої покладений імпульсно-фазовий метод, забезпечується подача на тиристори керуючих імпульсів з регульованою затримкою. Тобто завданням системи імпульсно-фазового керування (СІФК) є генерація імпульсів керування необхідної амплітуди, тривалості і форми, розподіл їх по відповідних вентилях, а також визначення моменту подачі цих імпульсів відносно переходу змінної напруги через нуль.

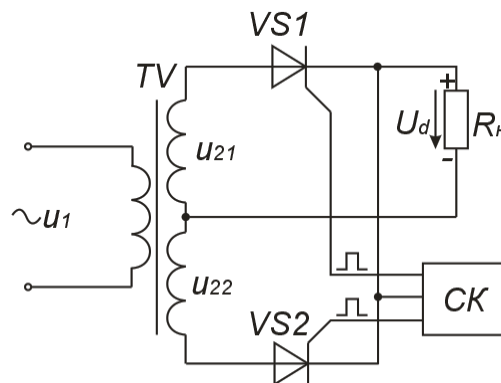


Рисунок 17.1 – Однофазний двонапівперіодний керований випрямляч з нульовим виводом трансформатора

Залежність середньої випрямленої напруги на навантаженні  $U_d$  від кута керування  $\alpha$  називається регульовальною характеристикою, її вигляд представлений на рисунку 17.2.

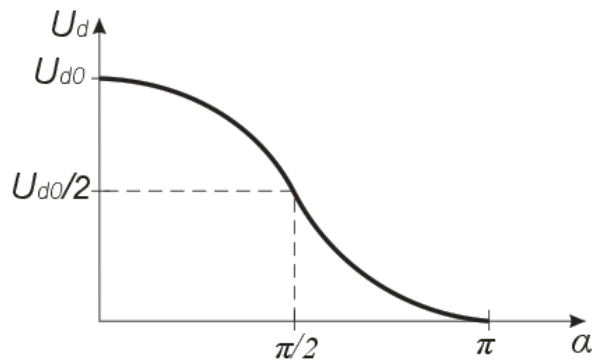




Рисунок 17.2 – Регулювальна характеристика керованого випрямляча

Керовані випрямлячі широко використовуються для регулювання напруги живлення нагрівачів, освітлювальних приладів, а також швидкості обертання електродвигунів і т.п.

### 17.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення керованого випрямляча.
2. Привести схему мостового фазообертача і його векторну діаграму напруг. Описати принцип роботи мостового фазообертача.
3. Привести схему однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча (рисунок 17.3). Описати призначення елементів схеми і принцип роботи керованого випрямляча.
4. Привести схему однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча з фазо-імпульсною системою керування (рисунок 17.5). Описати призначення елементів схеми і принцип роботи випрямляча.
5. Для однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча побудувати графіки зміни в часі (часові діаграми) струму керування  $I_K$ , напруги на тиристорі  $U_{VS}$  і навантаженні  $U_R$  при заданих значеннях напруги мережі  $U_M$  і кута керування тиристором  $\alpha$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 17.1.
6. Привести регулювальну характеристику керованого випрямляча  $U_d = f(\alpha)$ .

Таблиця 17.1 – Вихідні дані

№ вар.	$U_M$ , В	$\alpha$ , град.	$R_2$ , Ом	$C$ , мкФ	$R_H$ , Ом	№ вар.	$U_M$ , В	$\alpha$ , град.	$R_2$ , Ом	$C$ , мкФ	$R_H$ , Ом
1	20	10	50	6,0	20	16	110	140	350	5,0	55
2	40	30	70	5,5	30	17	130	160	370	6,0	65
3	60	50	90	5,0	40	18	150	15	390	4,5	75
4	80	70	110	4,5	50	19	170	35	410	3,0	85
5	100	90	130	4,0	60	20	190	55	430	1,5	95
6	120	110	150	3,5	70	21	210	75	450	1,0	105
7	140	130	170	3,0	80	22	230	95	470	2,2	115
8	160	150	190	2,5	90	23	25	115	490	3,2	125
9	180	170	210	2,0	100	24	45	135	510	4,2	110

10	200	20	230	1,5	110	25	65	155	60	5,2	95
11	220	40	250	1,0	120	26	85	25	80	6,2	80
12	30	60	270	0,5	130	27	105	45	100	5,8	65
13	50	80	290	2,0	25	28	125	65	120	5,4	50
14	70	100	310	3,0	35	29	145	85	140	5,0	35
15	90	120	330	4,0	45	30	165	105	160	4,6	20

### 17.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча (рисунк 17.3).
2. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця 17.1).

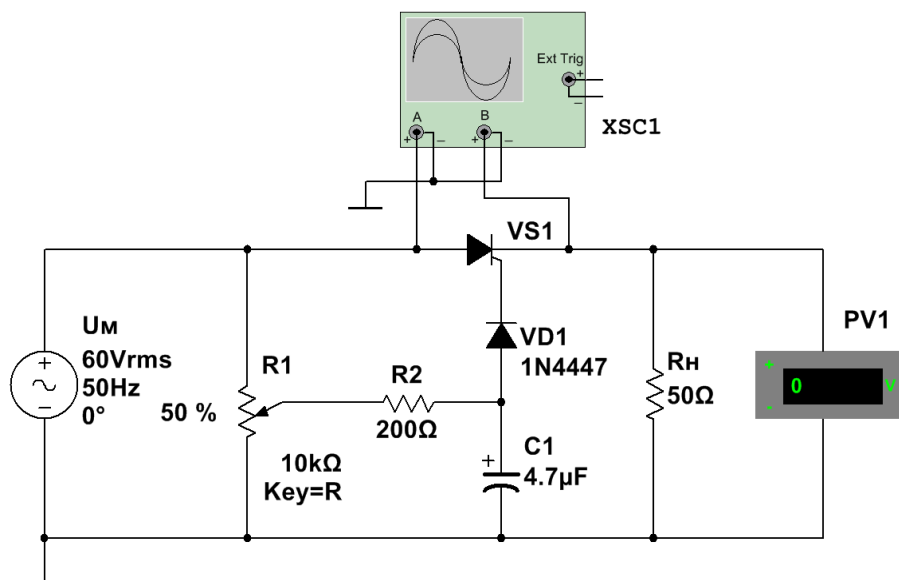


Рисунок 17.3 – Схема для дослідження однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча

3. Лінію, що з'єднує вхід “B” віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.
4. Включити схему. Змінюючи опір резистора  $R1$  фазообертача (виконаний на елементах  $R1$ ,  $R2$ ,  $C$ ), простежити за зміною величини випрямленої напруги  $U_d$  (вольтметр  $PV$ ) залежно від величини кута керування тиристором  $\alpha$  (визначається за допомогою осцилографа). Результати вимірів занести в таблицю 17.2.

Таблиця 17.2 – Результати досліджень однофазного

однонапівперіодного керованого випрямляча

$\alpha$ , ел. град.						
$U_d$ , В						

5. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруги на навантаженні при різних значеннях кута керування тиристором  $\alpha$  (див. рисунок 17.4).

6. За даними таблиці 17.2 побудувати регульовальну характеристику однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча  $U_d = f(\alpha)$ .

7. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча з фазо-імпульсною системою керування (рисунок 17.5).

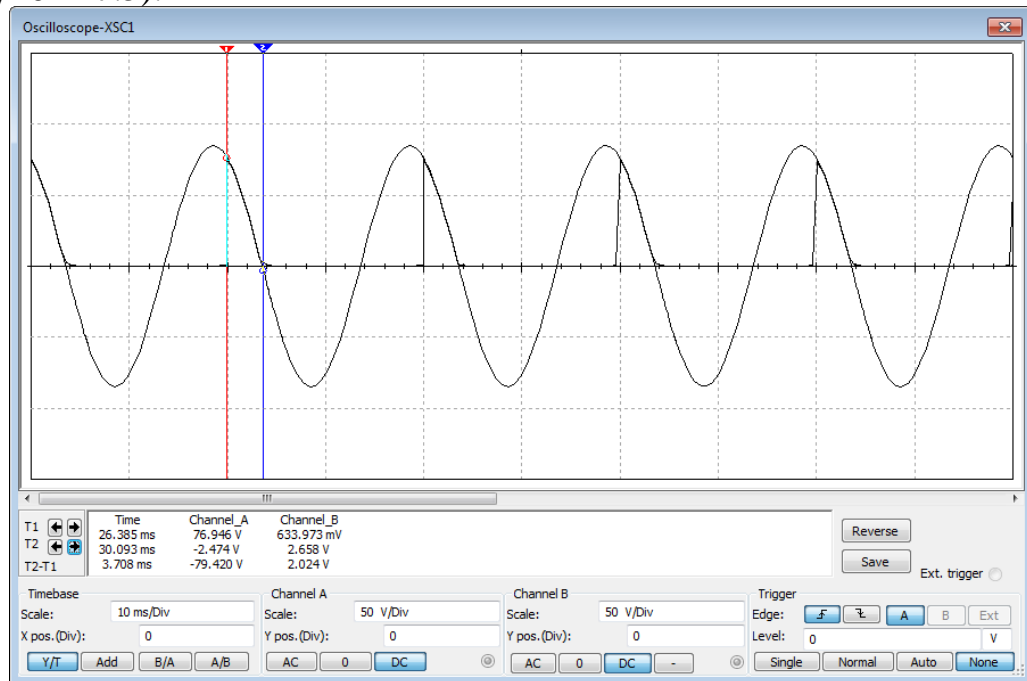


Рисунок 17.4 – Осцилограми напруг трифазного однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча

8. Установити задані параметри елементів схеми.

9. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

10. Включити схему. Змінюючи опір резистора  $R$  фазообертача простежити за зміною величини випрямленої напруги  $U_d$  залежно від

величини кута керування тиристором  $\alpha$ . Результати вимірів занести в таблицю 17.3.

Таблиця 17.3 – Результати досліджень однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча

$\alpha$ , ел. град.						
$U_d$ , В						

11. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруги на навантаженні при різних значеннях кута керування тиристором  $\alpha$  (див. рисунок 17.6).

12. За даними таблиці 17.3 побудувати регульовальну характеристику однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча  $U_d = f(\alpha)$ .

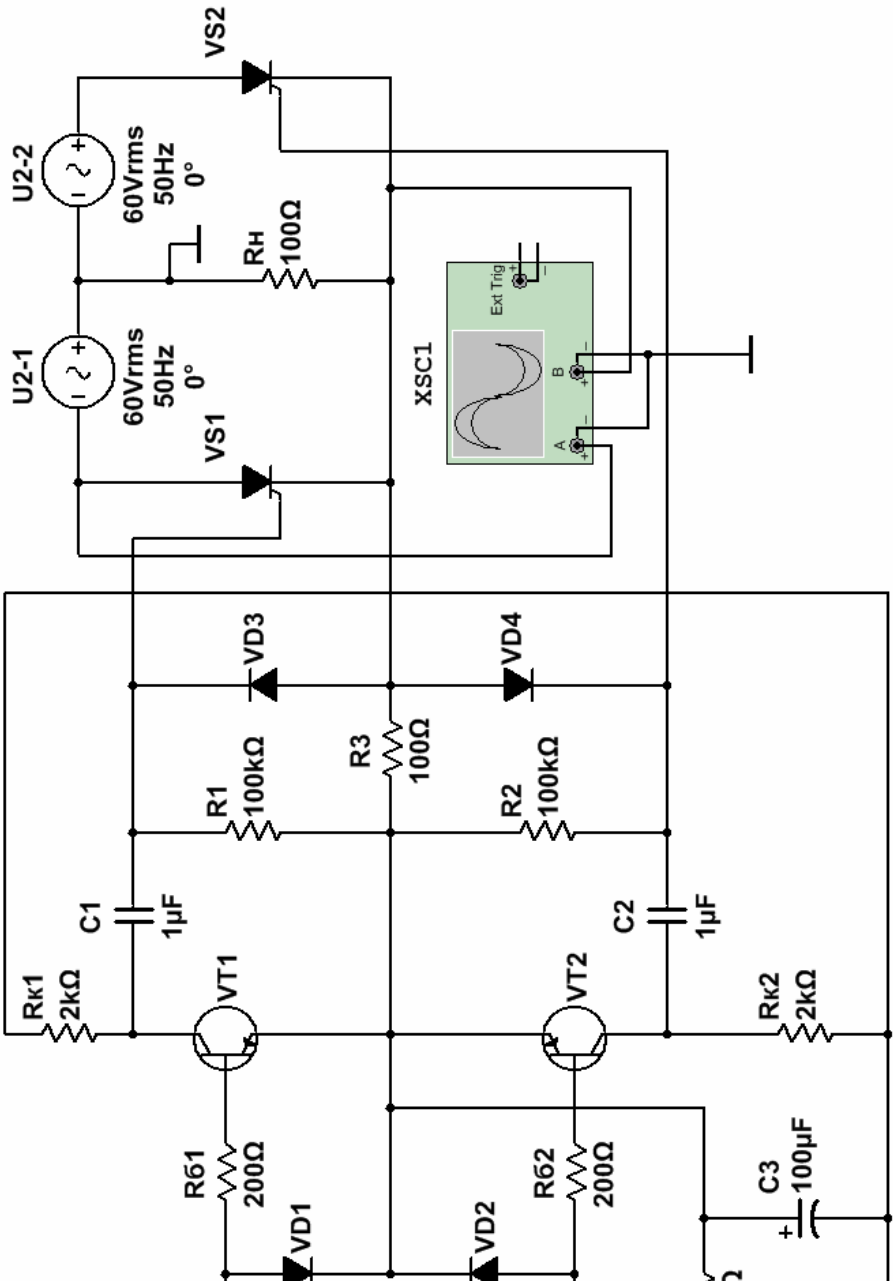


Рисунок 17.6 – Додаток до таблиці 17.3: осцилограми напруги на навантаженні при різних значеннях кута керування тиристором  $\alpha$

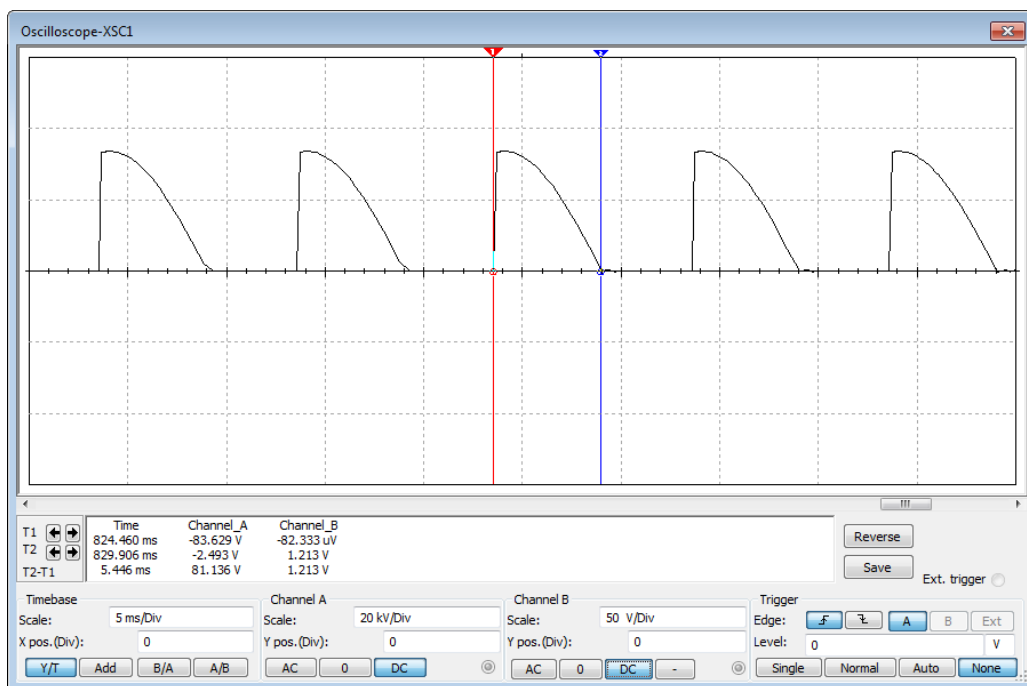


Рисунок 17.6 – Осцилограма вихідної напруги однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення керованих випрямлячів.
2. Поясніть, на чому базується принцип роботи тиристорних керованих випрямлячів?

3. Наведіть схему мостового фазообертача і його векторну діаграму напруг. Поясніть принцип роботи мостового фазообертача.

4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча.

5. Наведіть регулювальну характеристику тиристорного керованого випрямляча і поясніть характер її залежності при лінійних змінах кута керування.

6. Поясніть призначення систем імпульсно-фазового керування (СІФК). Назвіть види СІФК.

7. Наведіть структурну схему і поясніть принцип роботи СІФК з горизонтальним керуванням.

8. Поясніть, у чому полягає принцип дії СІФК з вертикальним керуванням. Наведіть структурну схему такої СІФК і поясніть призначення її вузлів.

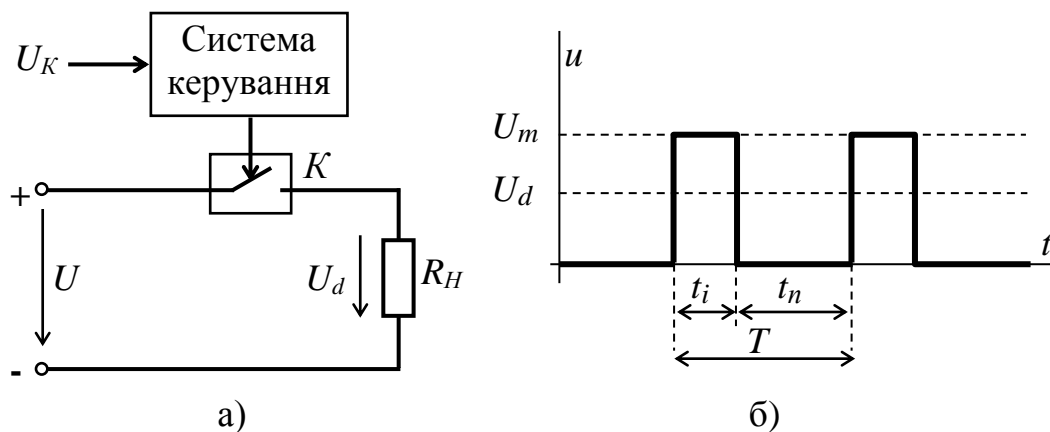
## 18 ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ (КОНВЕРТОРИ)

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (конверторів).

### 18.1 Загальні теоретичні відомості

**Конвертори** – це пристрої, які призначені для перетворення постійної напруги однієї величини в постійну напругу іншої величини.

За схемною реалізацією конвертори поділяються на перетворювачі постійної напруги із самозбудженням та імпульсні перетворювачі постійної напруги. Імпульсні перетворювачі постійної напруги (конвертори) використовуються для перетворення постійної напруги в постійну. Зміну величини напруги регулюють за допомогою параметрів імпульсів керування (рисунок 18.1, а).



$t_i$  – тривалість імпульсу;  $t_n$  – тривалість паузи;

$T = (t_i + t_n)$  – період імпульсів

Рисунок 18.1 – Принцип регулювання напруги навантаження

Для зміни параметрів імпульсів використовують широтно-імпульсний або частотно-імпульсний способи регулювання. При широтно-імпульсному способі вихідну напругу регулюють зміною тривалості вихідних імпульсів  $t_i$  при незмінному періоді їх надходження. При частотно-імпульсному способі вихідну напругу регулюють зміною частоти надходження вихідних імпульсів при незмінній тривалості імпульсу  $t_i$ , тобто змінюється період надходження імпульсів  $T$ .

Принцип роботи базується на ключовому режимі роботи транзистора або тиристора, внаслідок чого періодично переривається подання напруги на навантаження. Середнє значення напруги навантаження визначається за виразом

$$U_d = \delta U, \quad (18.1)$$

де  $U$  – напруга джерела живлення;

$\delta = t_i / T$  – коефіцієнт заповнення імпульсів.

Таким чином, напругу на навантаженні можна регулювати від 0 до  $U$ .

## 18.2 Завдання для самостійної підготовки

1. Привести визначення конвертора.
2. Привести схему конвертора (рисунок 18.2). Описати призначення елементів схеми і принцип роботи перетворювача.

На операційному підсилювачі  $DA$  реалізований мультивібратор, вихідна напруга якого через транзистор  $VT1$  управляє регулюючим елементом, який виконаний на транзисторі  $VT2$ . На елементах  $L$  і  $C2$  реалізований згладжуючий фільтр. Діод  $VD2$  призначений для створення контуру протікання струму навантаження при закритому регулюючому транзисторі  $VT2$ .

3. Розрахувати величину напруги на виході перетворювача

$$U_d = \frac{t_i}{T} E. \quad (18.2)$$

Параметри елементів мультивібратора  $C1$ ,  $R1$  і  $R2$  наведені на схемі перетворювача (рисунок 18.2), величини резисторів  $R3$  і  $R4$ , на-

пруга Е, що підлягає перетворенню, наведені в таблиці 18.1. Елементи  $C1$ ,  $R3$  визначають тривалість паузи

$$t_n = C1R3 \ln \left( 1 + \frac{2R1}{R2} \right), \quad (18.3)$$

а  $C1$ ,  $R4$  – тривалість імпульсу

$$t_i = C1R4 \ln \left( 1 + \frac{2R1}{R2} \right). \quad (18.4)$$

4. Змінюючи тривалість імпульсу в межах  $0,1T < t_i < 0,9T$ , побудувати графік залежності  $U_d = f(t_i)$ . Тривалість періоду  $T$  не змінюється ( $T = \text{const}$ ), що досягається тим, що сума опорів резисторів  $R3 + R4$  повинна залишатися постійною.

5. Побудувати графік залежності  $U_d = f(T)$  при незмінному значенні тривалості імпульсу ( $t_i = \text{const}$ ). Зміна тривалості періоду в межах  $t_i < T < 10t_i$  досягається зміною величини резистора  $R3$ .

### 18.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Набрати схему для дослідження конвертора (рисунок 18.2).

2. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця 18.1).

Таблиця 18.1 – Вихідні дані

№ вар.	Е, В	R3, кОм	R4, кОм	№ вар.	Е, В	R3, кОм	R4, кОм
1	15	10	120	16	95	85	45
2	25	15	115	17	100	90	40
3	30	20	110	18	105	95	35
4	35	25	105	19	110	100	30
5	40	30	100	20	115	105	25
6	45	35	95	21	120	110	20
7	50	40	90	22	17	115	15
8	55	45	85	23	22	120	10
9	60	50	80	24	27	25	120
10	65	55	75	25	32	35	110
11	70	60	70	26	37	45	100
12	75	65	65	27	42	55	90
13	80	70	60	28	47	65	80



14	85	75	55	29	52	75	70
15	90	80	50	30	57	85	60

3. Лінії, що з'єднують входи "А" і "В" віртуального осцилографа з контрольними точками схеми встановити кольоровими.

4. Включити схему. Зняти показання вольтметра  $PV$ . З віртуального осцилографа привести осцилограми напруг на виході мультівібратора і конвертора (див. рисунок 18.2).

5. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити тривалість імпульсу  $t_i$  і періоду  $T$  напруги мультівібратора.

6. Змінюючи величину опору резистора  $R3$ , зняти залежність величини вихідної напруги конвертора  $U_d$  від тривалості періоду  $U_d = f(T)$  ( $t_i = \text{const}$  – розрахункове значення) при частотно-імпульсному регулюванні. Результати вимірів занести в таблицю 18.2.

Таблиця 18.2 – Результати досліджень конвертора при частотно-імпульсному регулюванні

$R3$ , кОм	10	20	30	40	70	100	150	200	250
$t_i$ , мс									
$T$ , мс									
$U_H$ , В									

7. Змінюючи величину опорів резисторів  $R3$  і  $R4$  (сума опорів резисторів  $R3 + R4$  при цьому повинна залишатися постійною), зняти залежність величини вихідної напруги конвертора  $U_d$  від тривалості імпульсу  $U_d = f(t_i)$  ( $T = \text{const}$  – розрахункове значення) при широтно-імпульсному регулюванні. Результати вимірів занести в таблицю 18.3.

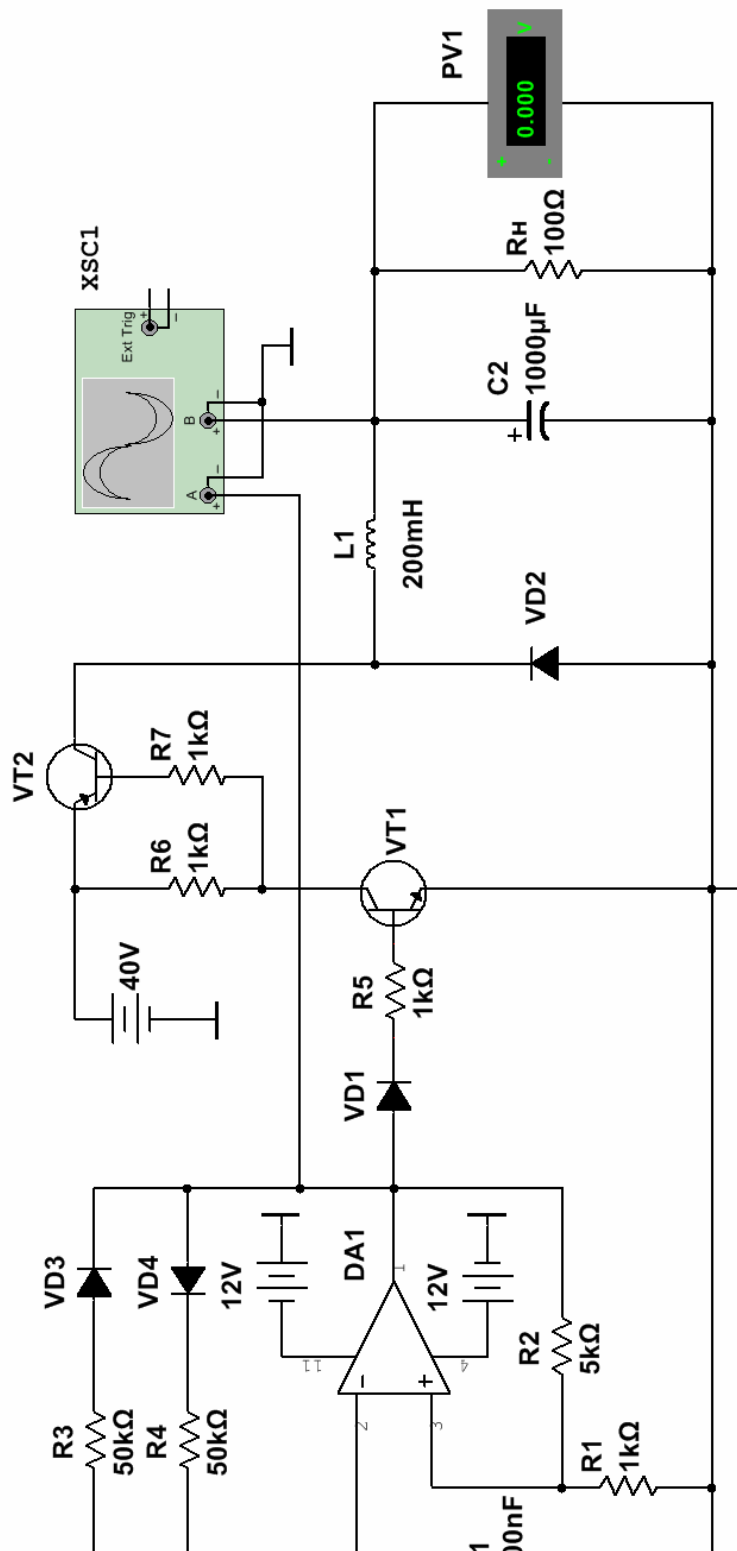
Таблиця 18.3 – Результати досліджень конвертора при широтно-імпульсному регулюванні

$R3$ , кОм									
$R4$ , кОм									
$t_i$ , мс									
$t_i / T$									
$U_H$ , В									

8. За даними п.п. 6, 7 побудувати графіки залежностей вихідної напруги конвертора від тривалості періоду  $U_d = f(T)$  і тривалості імпульсу  $U_d = f(t_i)$ .

### Контрольні питання

1. Поясніть призначення конверторів.
2. Назвіть методи регулювання напруги постійного струму, поясніть їх особливості.
3. Поясніть за допомогою часових діаграм принцип широтно-імпульсного та частотно-імпульсного способів регулювання вихідної напруги конверторів.
4. Поясніть, на чому базується принцип роботи імпульсного конвертора?
5. Наведіть схему і поясніть принцип роботи імпульсного конвертора.
6. Поясніть, чим визначається робоча частота конвертора?



18.2 – Схема для дослідження імпульсного перетворювача постійної напруги (конвертора)

## **ДОДАТОК А**

### **ТЕСТИ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ З ДИСЦИПЛІНИ «ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА»**

#### **1. Що називається дірчастою провідністю напівпровідника?**

- 1) провідність, яка обумовлена наявністю електронів і дірок;
- 2) провідність, обумовлена наявністю вільних електронів;
- 3) провідність, яка обумовлена наявністю електронів або дірок;
- 4) провідність, обумовлена наявністю надлишку рухомих дірок.

#### **2. Що називають електронною провідністю?**

- 1) провідність, яка обумовлена наявністю електронів і дірок;
- 2) провідність, обумовлена наявністю вільних електронів;
- 3) провідність, яка обумовлена наявністю електронів або дірок;
- 4) провідність, обумовлена наявністю надлишку рухомих дірок.

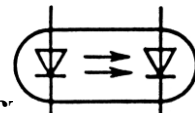
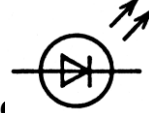
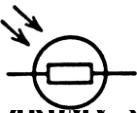
#### **3. В якому з напівпровідникових резисторів використовується залежність електричного опору напівпровідника від напруги?**

- 1) терморезистор;
- 3) тензорезистор;
- 2) фоторезистор;
- 4) варистор.

#### **4. В якому з напівпровідникових резисторів використовується залежність електричного опору напівпровідника від світлового потоку?**

- 1) терморезистор;
- 3) варистор;
- 2) фоторезистор;
- 4) тензорезистор.

**5. Виберіть правильне умовне позначення фоторезистора.**



**6. В якому з напівпровідникових резисторів використовується залежність електричного опору напівпровідника від температури?**

- 1) терморезистор;
- 2) варистор;
- 3) фоторезистор;
- 4) тензорезистор.

**7. Вибрати варіант відповіді. В яких з напівпровідникових резисторів використовується залежність електричного опору напівпровідника від механічної деформації?**

- 1) терморезистор;
- 2) тензорезистор;
- 3) фоторезистор;
- 4) варистор.

**8. Що називається *p-n* переходом?**

- 1) шар із підвищеною концентрацією основних носіїв зарядів;
- 2) область на межі двох напівпровідників з різними типами електропровідності;
- 3) шар із зниженою концентрацією основних носіїв зарядів;
- 4) область напівпровідника, де відбувається заповнення дірок електронами.

**9. Який вид пробою *p-n* переходу є небезпечним?**

- 1) тепловий;
- 2) електричний;

- 3) тепловий і електричний;
- 4) будь який пробій безпечний.

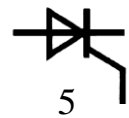
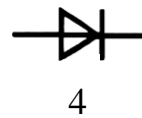
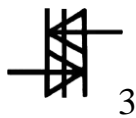
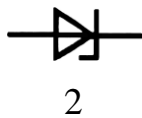
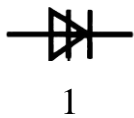
**10. В якому з напівпровідникових пристроїв використовується залежність ємності  $p-n$  переходу від величини зворотної напруги?**

- 1) варистор;
- 3) варікап;
- 2) варіконд;
- 4) тунельний діод.

**11. Яке призначення має напівпровідниковий випрямний діод?**

- 1) для перетворювання змінного струму в постійний;
- 2) для підсилення потужності електромагнітних коливань.
- 3) для перетворювання постійного струму в змінний;
- 4) для порівняння двох напруг.

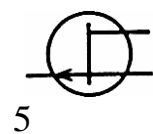
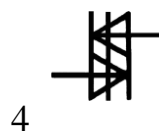
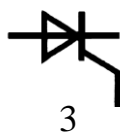
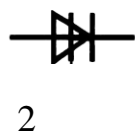
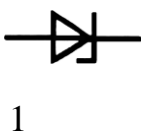
**12. Виберіть правильне умовне позначення напівпровідникового діода.**



**13. Яке призначення напівпровідникового стабілітрона?**

- 1) для перетворювання змінного струму в постійний;
- 2) для підсилення потужності електромагнітних коливань;
- 3) для перетворювання постійного струму в змінний;
- 4) для підтримки незмінного рівня напруги.

**14. Виберіть правильне умовне позначення напівпровідникового стабілітрона.**



**15. Для чого випрямні діоди вмикаються послідовно.**

- 1) для збільшення сумарної допустимої зворотної напруги;
- 2) для збільшення опору електричного кола;
- 3) для збільшення прямого струму, більшого за граничний струм одного діода;
- 4) для збільшення стабілізуючої напруги.

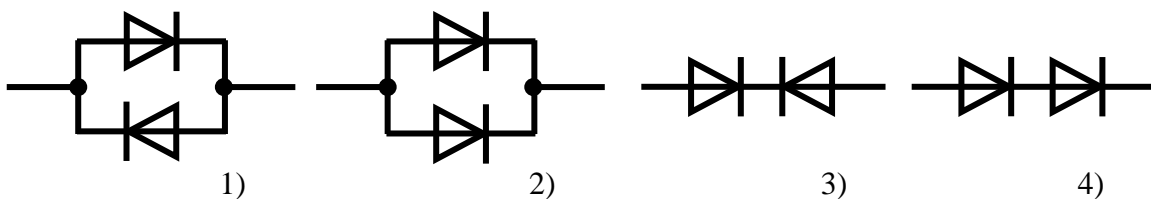
**16. В якому випадку випрямні діоди вмикаються паралельно.**

- 1) для збільшення сумарної допустимої зворотної напруги;
- 2) для зменшення опору електричного кола;
- 3) для збільшення стабілізуючої напруги;
- 4) для збільшення прямого струму, більшого за граничний струм одного діода.

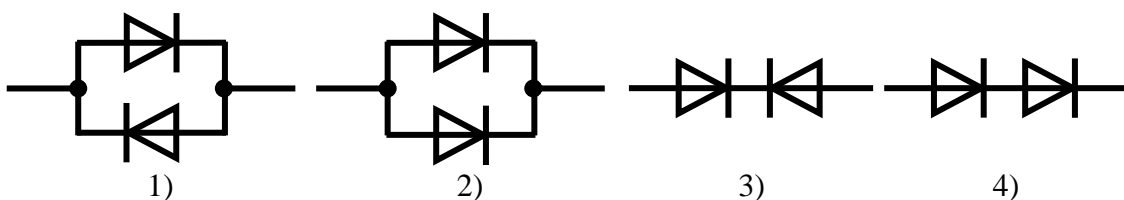
**17. Для чого стабілітрони вмикаються послідовно.**

- 1) для збільшення сумарної допустимої зворотної напруги;
- 2) для збільшення стабілізуючої напруги;
- 3) для збільшення прямого струму, більшого за граничний струм одного стабілітрона;
- 4) для збільшення опору електричного кола.

**18. Випрямний діод має максимальну зворотну напругу  $U_{зв} = 50$  В. Як необхідно ввімкнути два таких діоди в електричне коло, до якого підведена напруга  $U = 80$  В?**



**19. Як необхідно вмикати в електричне коло два однотипних випрямних діоди, які розраховані на максимально допустимий струм 100 мА кожний, якщо в колі протікає струм  $I = 150$  мА?**



20. Вкажіть вольт-амперну характеристику напівпровідникового діода (рисунок А.1).

21. Вкажіть ВАХ напівпровідникового стабілітрона (рисунок А.1).

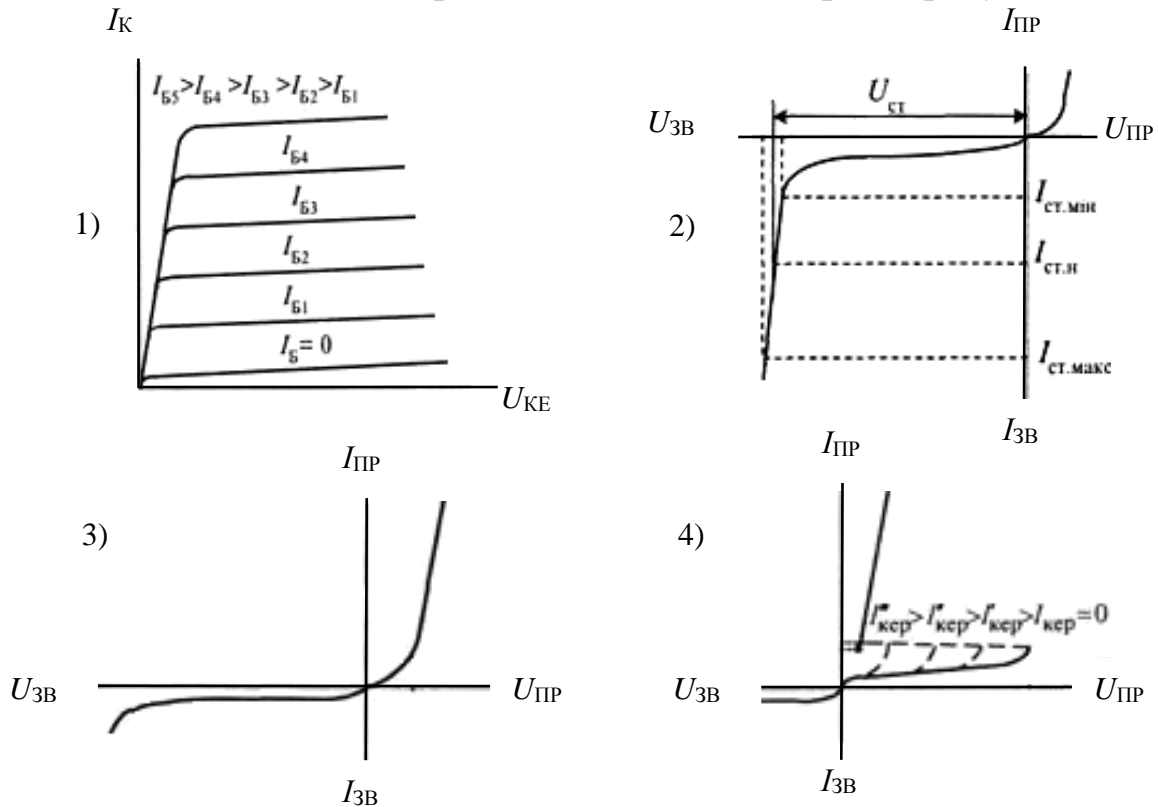
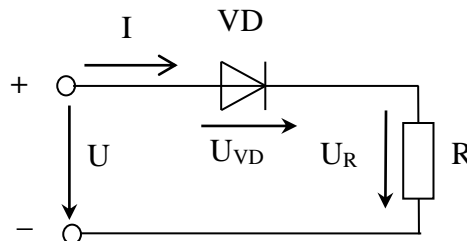


Рисунок А.1

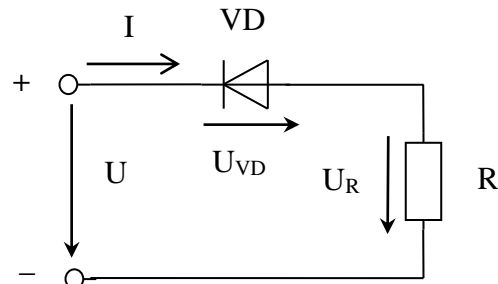
22. Відомо, що  $U = 12$  В. Визначить напругу на резисторі  $U_R$ .

- 1) 12 В;
- 2) 11 В;
- 3) 0 В;
- 4) 1 В.



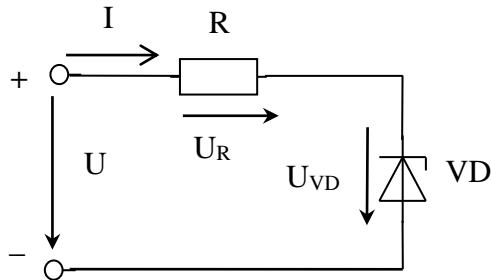
**23. Відомо, що  $U = 10 \text{ В}$ . Визначить напругу на резисторі  $U_R$ .**

- 1)  $U_R = 10 \text{ В}$ ;
- 2)  $U_R = 9 \text{ В}$ ;
- 3)  $U_R = 0 \text{ В}$ ;
- 4)  $U_R = 1 \text{ В}$ .



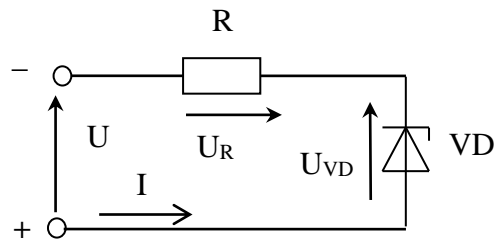
**24. Відомо, що  $U = 10 \text{ В}$ ;  $U_{CT \text{ VD}} = 7 \text{ В}$ . Визначити напругу на резисторі  $U_R$ .**

- 1)  $4 \text{ В}$ ;
- 2)  $6 \text{ В}$ ;
- 3)  $10 \text{ В}$ ;
- 4)  $14 \text{ В}$ .



**25. Відомо, що  $U = 12 \text{ В}$ ;  $U_{CT \text{ VD}} = 3 \text{ В}$ . Визначить напругу на стабілітроні  $U_{VD}$ .**

- 1)  $U_{VD} = 1 \text{ В}$ ;
- 2)  $U_{VD} = 12 \text{ В}$ ;
- 3)  $U_{VD} = 3 \text{ В}$ ;
- 4)  $U_{VD} = 9 \text{ В}$ .



**26. Під час перевірки випрямного діода за допомогою омметра, виявилося, що його прямий і зворотній опори  $R_{пр} = R_{зв} = 0$ . Оберіть вірну відповідь – як ви вважаєте, чи справний діод?**

- 1) діод справний;
- 2) між анодом і катодом коротке замикання;
- 3) у діода обрив;
- 4) омметр несправний.



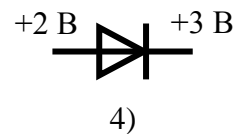
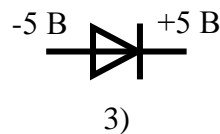
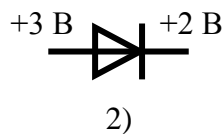
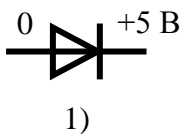
**27. Під час перевірки випрямного діода за допомогою омметра, виявилося, що прямий і зворотній опори діода  $R_{\text{пр}} = R_{\text{зв}} = \infty$ . Оберіть вірну відповідь – як ви вважаєте, чи справний діод?**

- 1) діод справний;
- 2) між анодом і катодом коротке замикання;
- 3) у діода обрив;
- 4) омметр несправний.

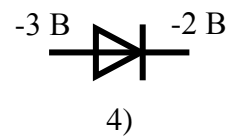
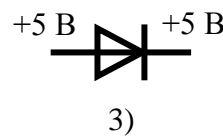
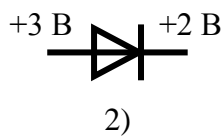
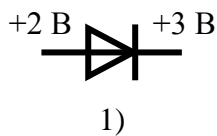
**28. Яким повинно бути співвідношення між прямим  $R_{\text{пр}}$  та зворотним  $R_{\text{зв}}$  опорами неущожденного напівпровідникового випрямного діода?**

- 1)  $R_{\text{пр}} = R_{\text{зв}}$ ;
- 2)  $R_{\text{пр}} < R_{\text{зв}}$ ;
- 3)  $R_{\text{пр}} \ll R_{\text{зв}}$ ;
- 4)  $R_{\text{пр}} > R_{\text{зв}}$ .

**29. Вибрати варіант відповіді. В якому випадку до напівпровідникового діода прикладена пряма напруга?**



**30. Вибрати варіант відповіді. В якому випадку до напівпровідникового діода прикладена зворотна напруга?**



**31. Яке призначення мають випрямлячі?**

- 1) для перетворення напруги змінного струму в напругу постійного струму;
- 2) для перетворення постійної напруги однієї величини в постійну напругу іншої величини;
- 3) для перетворення напруги постійного струму в напругу змінного струму;

4) для перетворення енергії джерела постійного струму в енергію електромагнітних коливань

**32. Яка головна позитивна властивість трифазного випрямляча?**

- 1) мала пульсація випрямленої напруги;
- 2) відсутність трансформатора з нульовим виводом;
- 3) невелика зворотна напруга на діодах;
- 4) невеликі струми діодів.

**33. Вкажіть схему однофазного однонапівперіодного випрямляча (рисунок А.2).**

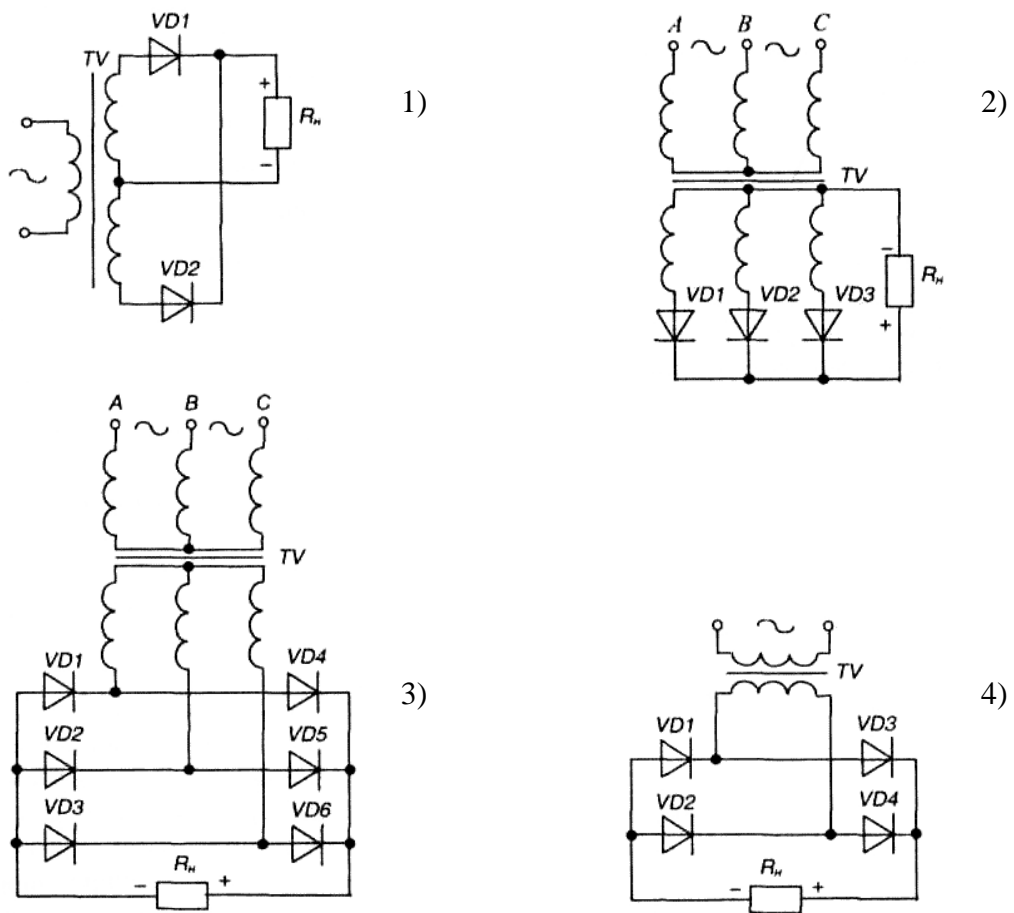


Рисунок А.2

**34. Вкажіть схему однофазного випрямляча з нульовим виводом (рисунок А.2).**

35. Вкажіть схему однофазного мостового випрямляча (рисунок А.2).

36. Вкажіть схему трифазного однонапівперіодного випрямляча (рисунок А.2).

37. Вкажіть схему трифазного двонапівперіодного випрямляча (рисунок А.2).

38. Яка з наведених часових діаграм (рисунок А.3) відповідає вихідній напрузі однонапівперіодного однофазного випрямляча?

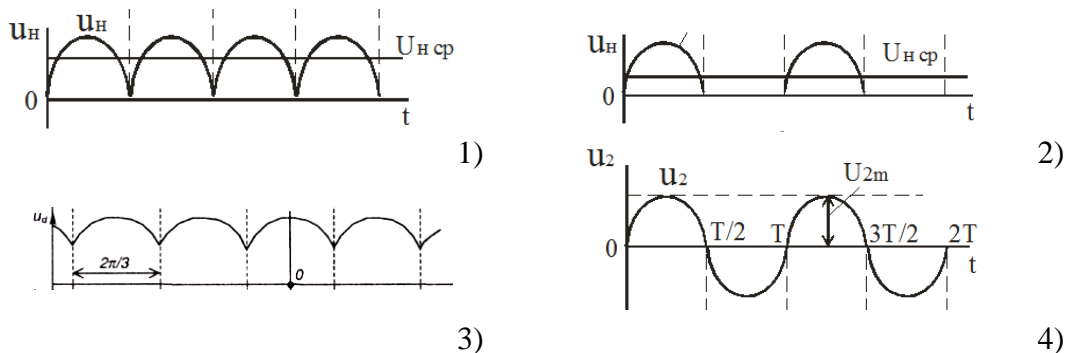


Рисунок А.3

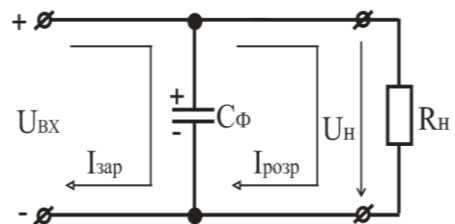
39. Яка з наведених часових діаграм (рисунок А.3) відповідає вихідній напрузі двонапівперіодного однофазного випрямляча?

40. Яке призначення мають згладжувальні фільтри?

- 1) для отримання випрямленої напруги незмінної величини;
- 2) для зменшення пульсацій випрямленої напруги;
- 3) для отримання більшої вихідної напруги;
- 4) для підвищення ККД випрямляча.

41. До чого приведе зменшення ємності конденсатора  $C_F$  згладжувального фільтра?

- 1) підвищиться пульсація напруги  $U_H$ ;
- 2) зменшиться пульсація напруги  $U_H$ ;
- 3) підвищиться напруга  $U_H$ ;
- 4) зменшиться напруга  $U_H$ .



**42. Яке призначення має стабілізатор напруги?**

- 1) для отримання випрямленої напруги;
- 2) для автоматичної підтримки незмінного значення напруги;
- 3) для перетворення напруги змінного струму в напругу постійного струму;
- 4) для зменшення пульсацій випрямленої напруги.

**43. Які прилади відносяться до перемикаючих?**

- 1) логічні елементи;
- 2) диністор, триністор, симістор, одноперехідний транзистор;
- 3) компаратор, одновібратор, мультивібратор;
- 4) напівпровідникові діоди.

**44. Який з напівпровідникових пристроїв має ділянку ВАХ з диференційним від'ємним опором?**

- 1) біполярний транзистор;
- 2) одноперехідний транзистор;
- 3) польовий транзистор;
- 4) напівпровідниковий діод.

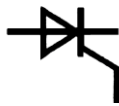
**45. Яку кількість  $p$ - $n$  переходів має диністор?**

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

**46. Виберіть правильне умовне позначення диністора.**



1



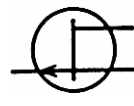
2



3



4



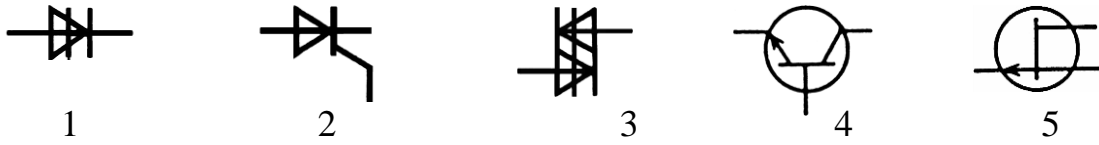
5

**47. Яку кількість  $p$ - $n$  переходів має некерований симістор?**

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;

4) 4.

48. Виберіть правильне умовне позначення симістора.



49. Вкажіть ВАХ триністора (рисунок А.4).

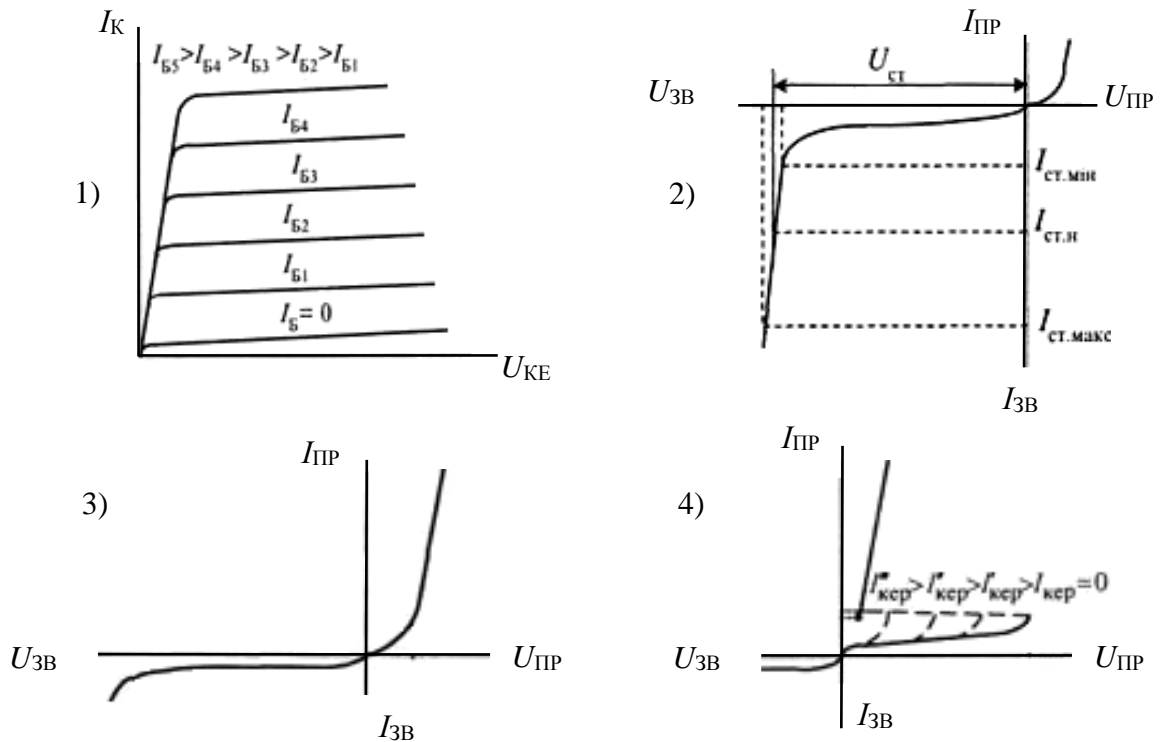
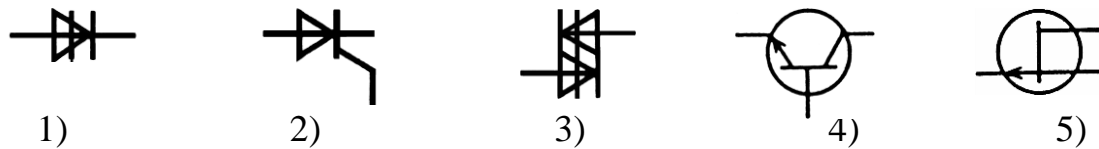
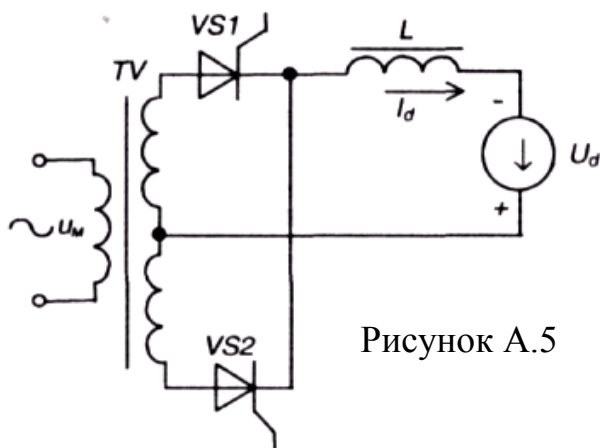


Рисунок А.4

50. Виберіть правильне умовне позначення біполярного транзистора.



51. Схема якого електронного пристрою представлена на рисунку А.5?



1) конвертор;

Рисунок А.5

- 2) керований випрямляч;
- 3) автономний інвертор;
- 4) інвертор, ведений мережею.

**52. Яке призначення має біполярний транзистор?**

- 1) для перетворювання змінного струму в постійний;
- 2) для підсилення потужності електромагнітних коливань;
- 3) для перетворювання постійного струму в змінний;
- 4) для порівняння двох напруг.

**53. Рухом яких носіїв заряду обумовлений струм біполярних транзисторів?**

- 1) дірок і електронів;
- 2) тільки електронів;
- 3) тільки дірок;
- 4) дірок або електронів.

**54. Вкажіть зв'язок між струмами колектора, емітера і бази біполярного транзистора?**

- 1)  $I_B = I_K - I_E$ ;
- 2)  $I_K = I_E - I_B$ ;
- 3)  $I_K = I_E + I_B$ ;
- 4)  $I_E = I_K - I_B$ .

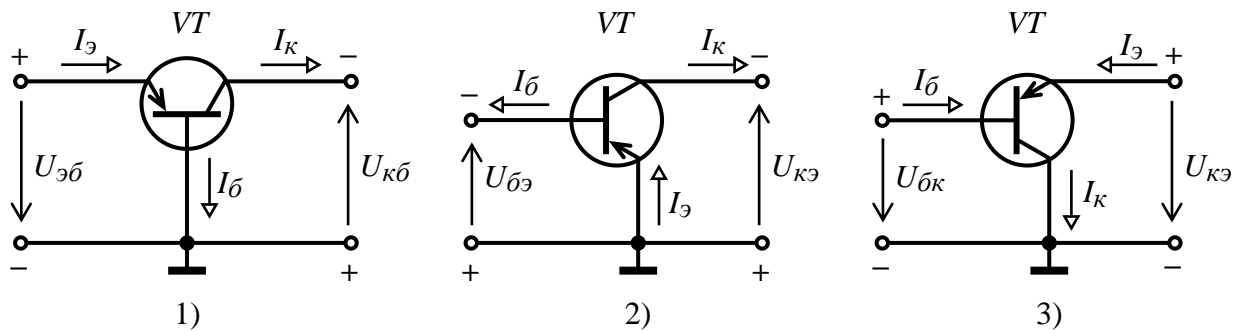
**55. Як визначається коефіцієнт підсилення струму  $\beta$  для схеми включення біполярного транзистора із спільним емітером?**

- 1)  $\beta = \frac{I_K}{I_B}$ ;
- 2)  $\beta = \frac{I_K - I_E}{I_B}$ ;
- 3)  $\beta = \alpha - 1$ ;
- 4)  $\beta = \frac{I_E}{I_B}$ .

**56. Як визначається коефіцієнт передачі струму  $\alpha$  для схеми включення біполярного транзистора із спільною базою?**

- 1)  $\alpha = \frac{I_K}{I_E}$ ;      2)  $\alpha = \frac{I_K - I_E}{I_B}$ ;  
 3)  $\alpha = \beta - 1$ ;      4)  $\alpha = \frac{I_E}{I_B}$ .

**57. Вкажіть схему вмикання біполярного транзистора із спільним емітером.**



**58. Вкажіть ВАХ біполярного транзистора (рисунок А.6).**

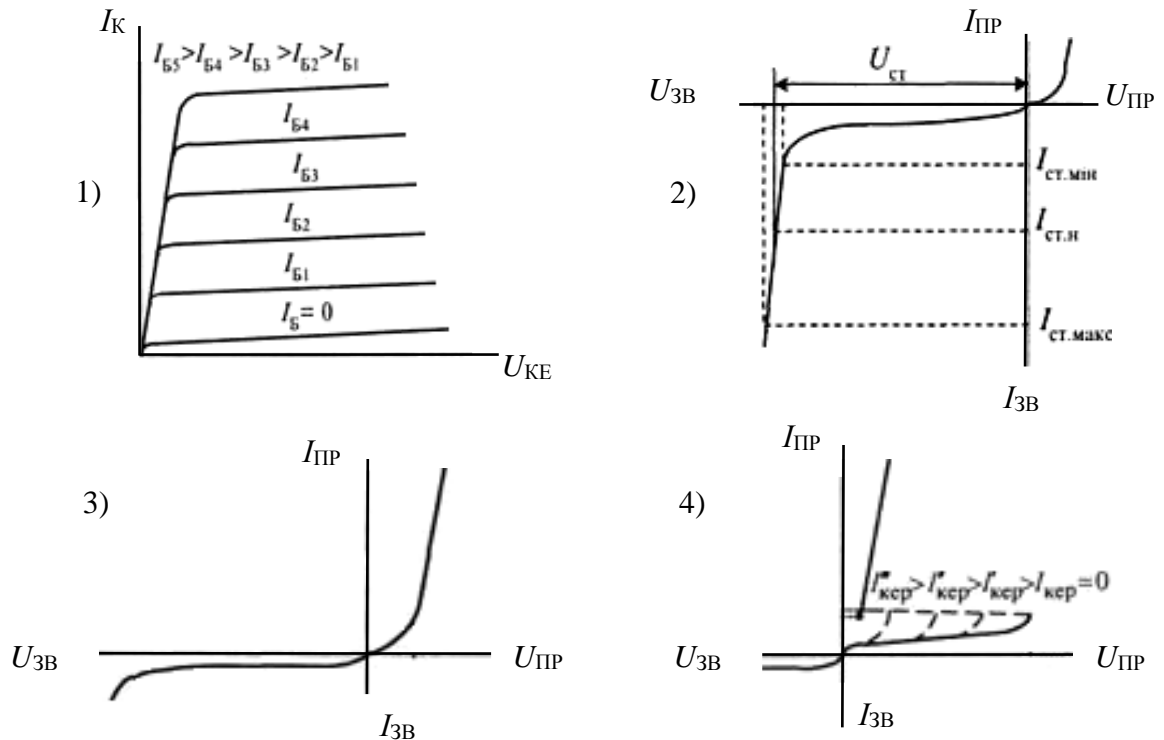


Рисунок А.6

**59. Вхідна характеристика біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером, це залежність \_\_\_\_\_.**

- 1)  $I_K = f(U_{KE})$   $I_B = \text{const}$ ;
- 2)  $I_B = f(U_{BE})$   $U_{KE} = \text{const}$ ;
- 3)  $I_K = f(U_{KB})$   $I_E = \text{const}$ ;
- 4)  $I_E = f(U_{BK})$   $U_{KE} = \text{const}$ .

**60. Вихідна характеристика біполярного транзистора, увімкненим за схемою із спільним емітером, це залежність \_\_\_\_\_.**

- 1)  $I_B = f(U_{BE})$   $U_{KE} = \text{const}$ ;
- 2)  $I_K = f(U_{KB})$   $I_E = \text{const}$ ;
- 3)  $I_K = f(U_{KE})$   $I_B = \text{const}$ ;
- 4)  $I_E = f(U_{BK})$   $I_B = \text{const}$ .

**61. Для чого призначені конденсатори  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$  у підсилювальному каскаді (рисунок А.7)?**

- 1) для пропускання постійної складової сигналу;
- 2) для забезпечення режиму спокою;
- 3) для пропускання змінної складової сигналу;
- 4) забезпечують незмінність коефіцієнта підсилення каскаду.

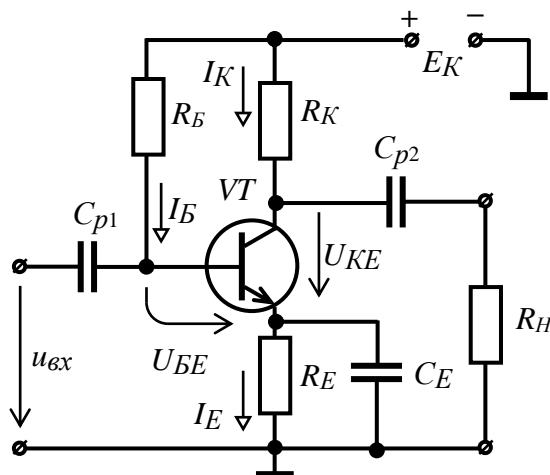


Рисунок А.7

**62. Для чого призначений резистор  $R_B$  у підсилювальному каскаді (рисунок А.7)?**



- 1) для створення вихідної напруги;
- 2) забезпечує незмінність коефіцієнта підсилення каскаду;
- 3) для пропускання постійної складової сигналу;
- 4) забезпечує роботу транзистора в режимі спокою.

**63. Для чого призначений резистор  $R_K$  у підсилювальному каскаді (рисунок А.7)?**

- 1) для забезпечення режиму спокою;
- 2) для пропускання постійної складової сигналу;
- 3) для створення вихідної напруги;
- 4) забезпечує незмінність коефіцієнта підсилення каскаду.

**64. Який з елементів підсилювального каскаду (рисунок А.7) із загальним емітером здійснює температурну стабілізацію положення робочої точки?**

- 1) конденсатор  $C_E$ ;
- 2) резистор  $R_E$ ;
- 3) конденсатори  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$ ;
- 4) резистор  $R_B$ .

**65. Як зміниться напруга  $U_{KE}$  підсилювального каскаду (рисунок А.7), якщо опір резистора  $R_B$  збільшиться у 2 рази?**

- 1) зменшиться у 2 рази;
- 2) не зміниться;
- 3) збільшиться у 2 рази;
- 4) підвищиться до рівня напруги живлення  $E_K$ .

**66. Як зміниться струм колектора  $I_K$  підсилювального каскаду (рисунок А.7), якщо напруга живлення  $E_K$  зменшиться у 2 рази?**

- 1) зменшиться у 2 рази;
- 2) не зміниться;
- 3) збільшиться у 2 рази;
- 4) зменшиться до нуля.

**67. Визначить опір резистора  $R_B$  (рисунок А.7), якщо  $E_K = 12\text{ В}$ ,  $U_{BE} = 1\text{ В}$ ,  $I_B = 1\text{ мА}$ .**

- 1)  $R_B = 12\text{ кОм}$ ;
- 2)  $R_B = 11\text{ кОм}$ ;
- 3)  $R_B = 13\text{ кОм}$ ;
- 3)  $R_B = 10\text{ кОм}$ .

**68. Як зміниться струм колектора  $I_K$  підсилювального каскаду (рисунок А.7), якщо напруга живлення  $E_K$  збільшиться у 2 рази?**

- 1) зменшиться у 2 рази;
- 2) не зміниться;
- 3) збільшиться у 2 рази;
- 4) зменшиться до нуля.

**69. Як зміниться напруга  $U_{KE}$  підсилювального каскаду (рисунок А.7), якщо опір резистора  $R_B$  зменшиться у 2 рази?**

- 1) зменшиться у 2 рази;
- 2) не зміниться;
- 3) збільшиться у 2 рази;
- 4) підвищиться до рівня напруги живлення  $E_K$ .

**70. Визначить струм бази  $I_B$  біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером (рисунок А.7), якщо струм колектора  $I_K = 100\text{ мА}$ , коефіцієнт підсилення транзистора за струмом  $\beta = 50$ .**

- 1)  $I_B = 50\text{ мА}$ ;
- 2)  $I_B = 2\text{ мА}$ ;
- 3)  $I_B = 5\text{ А}$ ;
- 4)  $I_B = 150\text{ мА}$ .

**71. Визначить струм колектора  $I_K$  біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером (рисунок А.7), якщо струм бази  $I_B = 0,2\text{ мА}$ , коефіцієнт підсилення транзистора за струмом  $\beta = 50$ .**

- 1)  $I_K = 4\text{ мкА}$ ;
- 2)  $I_K = 250\text{ мА}$ ;

- 3)  $I_K = 10 \text{ mA}$ ;
- 4)  $I_K = 100 \text{ mA}$ .

**72. Визначить струм бази  $I_E$  біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером (рисунок А.7), якщо струм колектора  $I_K = 100 \text{ mA}$ , коефіцієнт підсилення транзистора за струмом  $\beta = 50$ .**

- 1)  $I_E = 102 \text{ mA}$ ;
- 2)  $I_E = 2 \text{ mA}$ ;
- 3)  $I_E = 50 \text{ mA}$ ;
- 4)  $I_E = 150 \text{ mA}$ .

**73. Визначить напругу на колекторному переході  $U_{KE}$  біполярного транзистора (рисунок А.7), якщо  $E_K = 12 \text{ V}$ ,  $(R_K + R_E) = 300 \text{ Ом}$ ,  $I_K = 10 \text{ mA}$ .**

- 1)  $U_{KE} = 3 \text{ V}$ ;
- 2)  $U_{KE} = 1,2 \text{ V}$ ;
- 3)  $U_{KE} = 9 \text{ V}$ ;
- 4)  $U_{KE} = 12 \text{ V}$ .

**74. Коефіцієнт підсилення за потужністю підсилювального каскаду  $K_P = 200$ . Визначить коефіцієнт підсилення за напругою  $k_U$ , якщо коефіцієнт підсилення за струмом  $k_I = 50$ .**

- 1)  $k_U = 10000$ ;
- 2)  $k_U = 250$ ;
- 3)  $k_U = 4$ ;
- 3)  $k_U = 150$ .

**75. Коефіцієнт підсилення за потужністю підсилювального каскаду  $K_P = 250$ . Визначить коефіцієнт підсилення за струмом  $k_I$ , якщо коефіцієнт підсилення за напругою  $k_U = 10$ .**

- 1)  $k_I = 2500$ ;
- 2)  $k_I = 250$ ;
- 3)  $k_I = 240$ ;
- 4)  $k_I = 25$ .

**76. В якому з режимів транзистора використовується чергування відтинання та насичення?**

- 1) генераторному;
- 2) імпульсному;
- 3) підсилення;
- 4) сполучення опору.

**77. Які з режимів відповідають роботі транзистора у якості ключа?**

- 1) відтинання і насичення;
- 2) тільки відтинання;
- 3) активний і відтинання;
- 3) тільки насичення.

**78. Яка точка на рисунку А.8 відповідає режиму закритого стану транзистора (режиму відсічки)?**

- 1)  $T_1$ ;
- 2)  $T_2$ ;
- 3)  $T_3$ ;
- 4)  $T_0$ .

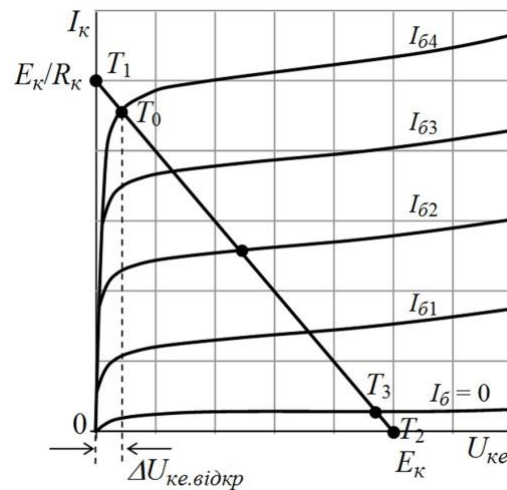


Рисунок А.8

**79. Яка точка на рисунку А.8 відповідає відкритому стану транзистора (режиму насичення)?**

- 1)  $T_1$ ;
- 2)  $T_2$ ;
- 3)  $T_3$ ;
- 4)  $T_0$ .

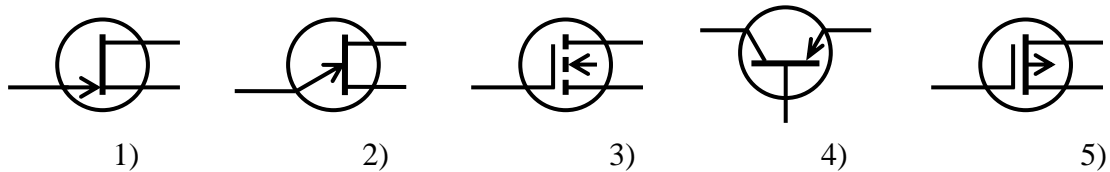
**80. Яке призначення має польовий транзистор?**

- 1) для перетворювання змінного струму в постійний;
- 2) для підсилення потужності електромагнітних коливань;
- 3) для перетворювання постійного струму в змінний;
- 4) для порівняння двох напруг.

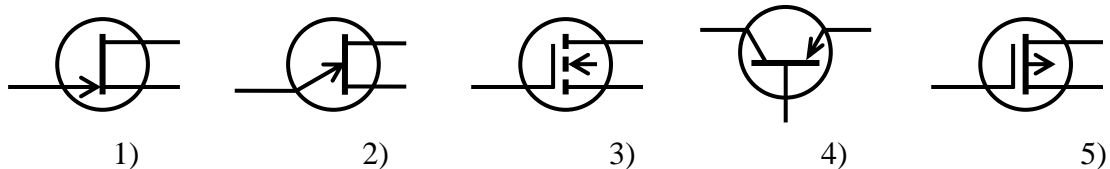
**81. Який з транзисторів має найбільший вхідний опір?**

- 1) біполярний транзистор  $p-n-p$  типу;
- 2) польовий транзистор з керуючим  $p-n$  переходом;
- 3) польовий транзистор з ізольованим затвором;
- 4) біполярний транзистор  $n-p-n$  типу.

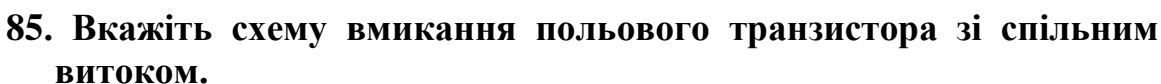
**82. Вкажіть умовне графічне позначення польового транзистора з керуючим  $p-n$  переходом.**



**83. Виберіть правильне умовне позначення польового транзистора із вбудованим каналом.**



**84. Виберіть правильне умовне позначення польового транзистора з індукованим каналом.**



- 

Рисунок А.9

- 87. Чим забезпечується режим спокою в схемі підсилювального каскаду на польовому транзисторі (рисунок А.9)?**

- 1) напругою  $U_{CB}$ ;
- 2) струмом  $I_B$ ;
- 3) струмом  $I_C$ ;
- 4) напругою  $U_{3B}$ .

**88. Стік-затворна характеристика польового транзистора, увімкненого за схемою із спільним витоком, це залежність \_\_\_\_\_.**

- 1)  $I_C = f(U_{3B}) \quad U_{CB} = \text{const}$ ;
- 2)  $I_C = f(U_{CB}) \quad U_{3B} = \text{const}$ ;
- 3)  $I_3 = f(U_{3B}) \quad U_{CB} = \text{const}$ ;
- 4)  $U_{3B} = f(I_C) \quad U_{CB} = \text{const}$ .

**89. Вихідна характеристика польового транзистора, увімкненого за схемою із спільним витоком, це залежність \_\_\_\_\_.**

- 1)  $I_C = f(U_{3B}) \quad U_{CB} = \text{const}$ ;
- 2)  $I_C = f(U_{CB}) \quad U_{3B} = \text{const}$ ;
- 3)  $I_3 = f(U_{3B}) \quad U_{CB} = \text{const}$ ;
- 4)  $U_{3B} = f(I_C) \quad U_{CB} = \text{const}$ .

**90. Рухом яких носіїв заряду обумовлений струм польових транзисторів?**

- 1) тільки дірок;
- 2) тільки електронів;
- 3) дірок і електронів;
- 4) дірок або електронів.

**91. Як визначається крутизна стік-затворної характеристики польового транзистора?**

- 1)  $S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}}$ ;
- 2)  $S = \alpha - \beta$ ;
- 3)  $S = \Delta U_{CB} - \Delta U_{3B}$ ;
- 4)  $S = \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta U_{3B}}$ .

**92. Визначить напругу відтинання  $U_{3B, \text{відт}}$  польового транзистора з керуючим  $p-n$  переходом, якщо початковий струм стоку  $I_{C, \text{поч}} = 5 \text{ мА}$ , крутизна  $S = 2,5 \text{ мА/В}$ .**

- 1)  $U_{ЗВ.ВІДТ} = 2 \text{ В};$
- 2)  $U_{ЗВ.ВІДТ} = 7,5 \text{ В};$
- 3)  $U_{ЗВ.ВІДТ} = 5 \text{ В};$
- 4)  $U_{ЗВ.ВІДТ} = 2,5 \text{ В}.$

**93. Вкажіть, при якій напрузі через канал польового транзистора з керуючим *p-n* переходом тече максимальний струм стоку?**

- 1) при напрузі відсічки затвор-виток  $U_{ЗВ.ВІДС};$
- 2) при напрузі затвор-виток  $U_{ЗВ} = 0;$
- 3) при напрузі стік-виток  $U_{СВ} = 0;$
- 4) при напрузі вмикання  $U_{ВМИК}.$

**94. Визначить початковий струм стоку  $I_{С.ПОЧ}$  польового транзистора з керуючим *p-n* переходом, якщо напруга відсічки  $U_{ЗВ.ВІДС} = 2 \text{ В},$  крутизна  $S = 3 \text{ мА/В}.$**

- 1)  $I_{С.ПОЧ} = 6 \text{ мА};$
- 2)  $I_{С.ПОЧ} = 1 \text{ мА};$
- 3)  $I_{С.ПОЧ} = 5 \text{ мА};$
- 4)  $I_{С.ПОЧ} = 3 \text{ мА}.$

**95. Визначить коефіцієнт підсилення за напругою  $K_U$  підсилювального каскаду на польовому транзисторі, якщо напруга затвор-виток  $U_{ЗВ} = 2 \text{ мВ};$  напруга стік-виток  $U_{СВ} = 10 \text{ В}.$**

- 1)  $K_U = 20;$
- 2)  $K_U = 200;$
- 3)  $K_U = 5000;$
- 4)  $K_U = 800.$

**96. Визначить опір резистора  $R_{ОС}$  інвертуючого підсилювача (рисунк А.10), якщо вихідна напруга  $U_{ВЫХ} = 10 \text{ В}, R_1 = 1 \text{ кОм},$  напруга  $U_{ВХ} = -0,1 \text{ В}.$**

- 1)  $100 \text{ кОм};$
- 2)  $1 \text{ МОм};$
- 3)  $10 \text{ кОм};$
- 4)  $1 \text{ кОм}.$

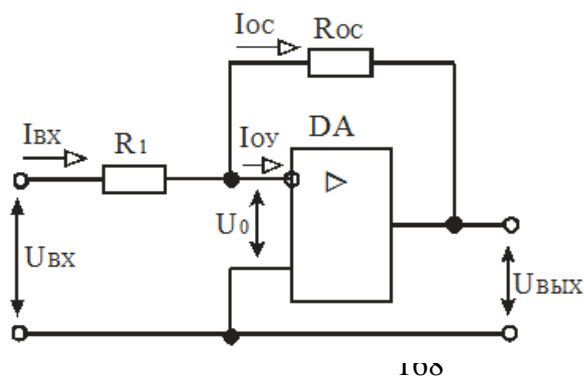




Рисунок А.10

**97. Визначте опір резистора  $R_1$  інвертуючого підсилювача (рисунок А.10), якщо вихідна напруга  $U_{\text{вих}} = 10 \text{ В}$ ,  $R_{\text{ос}} = 200 \text{ кОм}$ , напруга  $U_{\text{вх}} = -0,5 \text{ В}$ .**

- 1) 100 кОм;
- 2) 20 кОм;
- 3) 10 кОм;
- 4) 1 кОм.

**98. Визначте вхідну напругу  $U_{\text{вх}}$  інвертуючого підсилювача (рисунок А.10), якщо  $R_{\text{ос}} = 100 \text{ кОм}$ ,  $R_1 = 1 \text{ кОм}$ , напруга  $U_{\text{вих}} = 5 \text{ В}$ .**

- 1) 0,5 В;
- 2) -1 В;
- 3) -0,05 В;
- 4) 1 В.

**99. Визначте вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$  інвертуючого підсилювача (рисунок А.10), якщо  $R_{\text{ос}} = 100 \text{ кОм}$ ,  $R_1 = 10 \text{ кОм}$ , напруга  $U_{\text{вх}} = 0,1 \text{ В}$ .**

- 1) 1 В;
- 2) -10 В;
- 3) -1 В;
- 4) 9 В.

**100. Для чого призначені генератори синусоїдальних коливань?**

- 1) для перетворення електричної енергії джерела постійного струму в енергію електромагнітних коливань;
- 2) для перетворення енергії джерела змінного струму в енергію електромагнітних коливань;

- 3) для перетворення напруги змінного синусоїдального струму в напругу постійного струму;  
4) для перетворення електричної енергії джерела постійного струму в енергію електричних синусоїдальних коливань заданої частоти.

**101. Який зворотний зв'язок застосовується у генераторах синусоїдальних коливань?**

- 1) від'ємний;  
2) ємнісний;  
3) індуктивний;  
4) додатний.

**102. Вкажіть формулу, за якою визначають частоту коливань вихідної напруги RC-генераторів.**

- 1)  $f_o = \frac{1}{2\pi RC}$ ;                      2)  $\omega_o = \frac{2\pi}{RC}$ ;  
3)  $\omega_o = \frac{RC^2}{2}$ ;                      4)  $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

**103. Вкажіть формулу, за якою визначають частоту коливань вихідної напруги LC-генераторів.**

- 1)  $\omega_0 = \frac{2\pi}{LC}$ ;                      2)  $f_0 = \frac{1}{\sqrt{RC}}$ ;  
3)  $\omega_0 = LC$ ;                      4)  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

**104. Вкажіть якою буквою позначена тривалість імпульсу  $t_{\text{імп}}$  (рисунок А.11).**

- 1) A;    2) B;    3) C;    4) D.

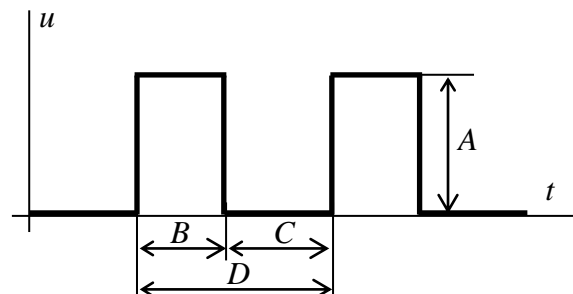


Рисунок А.11

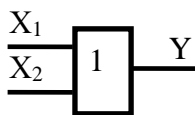
**105. Вибрати варіант відповіді. Вкажіть якою буквою позначений період надходження імпульсів Т (рисунок А.11).**

- 1) А; 2) В; 3) С; 4) D.

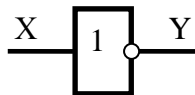
**106. Що називають частотою повторення імпульсів?**

- 1) відношення тривалості імпульсів до періоду їх проходження;
- 2) величина, що характеризує тривалість імпульсу в часі;
- 3) інтервал часу між відповідними точками двох сусідніх імпульсів;
- 4) величина, зворотна періоду повторення.

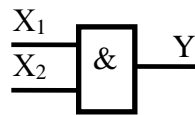
**107. Вкажіть умовне позначення логічного елемента АБО (рисунок А.12).**



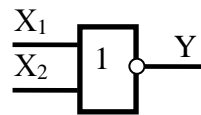
1)



2)



3)



4)

Рисунок А.12

**108. Вкажіть умовне позначення логічного елемента І-НІ (рисунок А.12).**

**109. Вибрати варіант відповіді. Якому логічному елементу відповідає наведена таблиця істинності.**

- 1) АБО;
- 2) НІ;
- 3) І;
- 4) АБО-НІ.

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

**110. Вибрати варіант відповіді. Якому логічному елементу відповідає наведена таблиця істинності.**

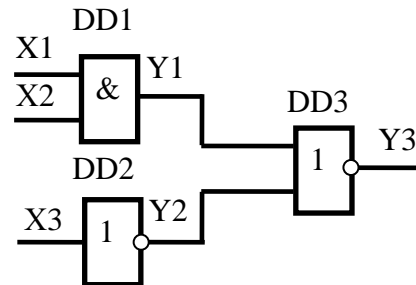
- 1) НІ;

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

- 2) АБО;
- 3) І;
- 4) АБО-НІ.

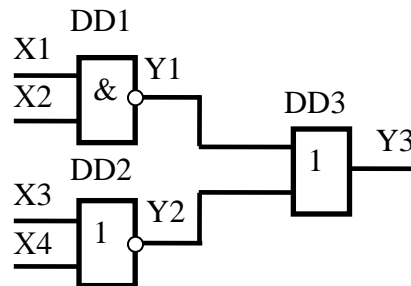
**111.** Для схеми на логічних елементах визначити значення сигналів  $Y1$ ,  $Y2$ ,  $Y3$  при комбінаціях входних сигналів:  $X1 = 0$ ,  $X2 = 0$ ,  $X3 = 1$ .

- 1)  $Y1 = 1$ ;  $Y2 = 1$ ;  $Y3 = 0$ ;
- 2)  $Y1 = 1$ ;  $Y2 = 0$ ;  $Y3 = 1$ ;
- 3)  $Y1 = 0$ ;  $Y2 = 1$ ;  $Y3 = 0$ ;
- 4)  $Y1 = 0$ ;  $Y2 = 0$ ;  $Y3 = 1$ .



**112.** Для схеми на логічних елементах визначити значення сигналу  $Y1$ ,  $Y2$ ,  $Y3$  при комбінаціях входних сигналів:  $X1 = 1$ ,  $X2 = 0$ ,  $X3 = 1$ ,  $X4 = 0$ .

- 1)  $Y1 = 1$ ;  $Y2 = 1$ ;  $Y3 = 0$ ;
- 2)  $Y1 = 1$ ;  $Y2 = 0$ ;  $Y3 = 1$ ;
- 3)  $Y1 = 0$ ;  $Y2 = 1$ ;  $Y3 = 0$ ;
- 4)  $Y1 = 0$ ;  $Y2 = 0$ ;  $Y3 = 1$ .

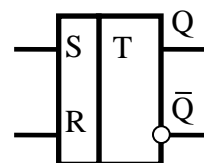


**113.** Який електронний пристрій характеризується двома стійкими станами рівноваги та здатний стрибком переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу?

- 1) логічний елемент;
- 2) операційний підсилювач;
- 3) тригер;
- 4) мультівібратор.

**114.** Якому тригеру відповідає наведене умовне графічне позначення?

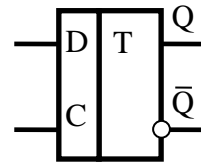
- 1)  $T$  – тригер;
- 2)  $D$  – тригер;



3)  $RS$  – тригер; 4)  $JK$  – тригер.

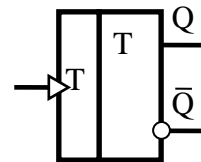
**115. Якому тригеру відповідає наведене умовне графічне позначення?**

- 1)  $T$  – тригер;
- 2)  $D$  – тригер;
- 3)  $RS$  – тригер;
- 4)  $JK$  – тригер.



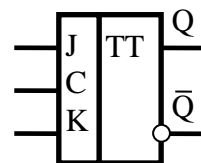
**116. Якому тригеру відповідає наведене умовне графічне позначення?**

- 1)  $T$  – тригер;
- 2)  $D$  – тригер;
- 3)  $RS$  – тригер;
- 4)  $JK$  – тригер.



**117. Якому тригеру відповідає наведене умовне графічне позначення?**

- 1)  $T$  – тригер;
- 2)  $D$  – тригер;
- 3)  $RS$  – тригер;
- 4)  $JK$  – тригер.



**118. Який пристрій призначений для порівняння двох напруг, що поступають на його входи.**

- 1) логічний елемент;
- 2) тригер;
- 3) компаратор;
- 4) мультивібратор.

**119. При якій умові у компаратора відбувається зміна полярності напруги на виході операційного підсилювача?**

- 1) при досягненні вхідною напругою рівня опорної напруги;
- 2) при наявності на вході короткого запускаючого імпульсу;
- 3) при збільшенні напруги живлення;

4) якщо відсутня вхідна напруга.

**120. Який електронний пристрій призначений для перетворення напруги постійного струму в напругу змінного струму заданої або регульованої частоти?**

- 1) трансвертер;
- 2) керований випрямляч.
- 3) конвертор;
- 4) інвертор.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: навчальний посібник / С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев, О.В. Нікітіна; за ред. проф. В.Ф. Яковлева. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 329 с.
2. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: навчальний посібник / С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев, О.В. Нікітіна; за ред. проф. В.Ф. Яковлева. – Суми: «Сумський національний аграрний університет», 2012. – 285 с.
3. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: посібник для виконання лабораторних і практичних занять / С.О. Квітка, Ю.М. Федюшко, Н.Г. Косуліна, С.О. Мороз; ХНТУСГ. – Х.: ФОП Мезіна В.В., 2017. – 244 с.
4. Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с.
5. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.
6. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2003. – 368 с.
7. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. – К.: Либідь, 1993. – 432 с.
8. Гуржій А.М. Імпульсна та цифрова техніка. Підручник / А.М. Гуржій; В.В. Самсонов, Н.І. Поваротнюк. – Х.: компанія «Сміт», 2005. – 424 с.
9. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основы електроніки: функціональні елементи та їх застосування. Підручник для студентів неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Львів: «Новий Світ – 2000»; «Магнолія плюс», 2003. – 208 с.
10. Гершунский Б.С. Справочник по расчету электронных схем. – К.: Вища школа. Изд-во при Киев. ун-те, 1983. – 240 с.
11. Скаржепа В.А. и др. Электроника и микросхемотехника: Лабораторный практикум / В.А. Скаржепа, А.А. Новацкий, В.И. Сенько; Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. – Выща.шк. – Головное изд-во, 1989. – 279 с.
12. Скаржепа В.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника: Сб. задач / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 232 с.
13. Дмитрів В.Т., Шиманський В.М. Електроніка і мікросхемотехніка: Навч. посібник. – Львів: Афіша, 2006. – 175 с.

14. Терещук Р.М. Полупроводниковые приемно-усили-тельные устройства: Справочник радиолюбителя / Р.М. Терещук, К.М. Терещук, С.А. Седов. – Киев: Наук. думка, 1988. – 800 с.
15. Резисторы: Справочник / В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Пратусевич и др.; Под ред. И.И. Четверикова и В.М. Терехова, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
16. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / В.П. Берзан, Б.Ю. Геликман, М.Н. Граевский и др.; Под ред. Г.С. Кучинского, – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
17. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Отечественные полупроводниковые приборы / 5-е изд., доп. и испр. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 584 с.
18. Нефедов А.В. Транзисторы для бытовой, промышленной и специальной аппаратуры. Справочное пособие / А.В. Нефедов, А.И. Аксенов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2006. – 600 с.
19. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / С.В. Якубовский, Л.И. Ниссельсон, В.И. Кулешова и др.; Под ред. С.В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1989. – 496 с.